

Exploração de produtos de altimetria por satélite melhorados em zonas costeiras

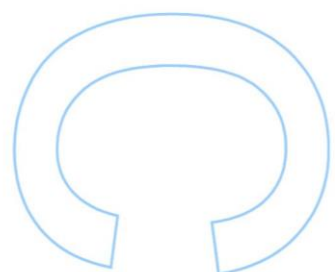
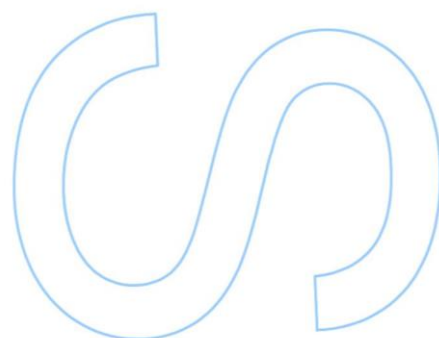
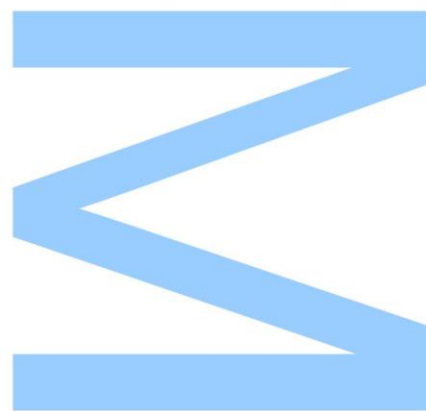
Teresa Patrícia Gomes dos Santos

Mestrado em Engenharia Geográfica

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
2016

Orientador

Maria Joana Afonso Pereira Fernandes, Professor Auxiliar,
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

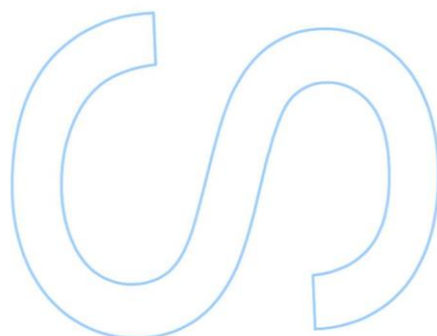
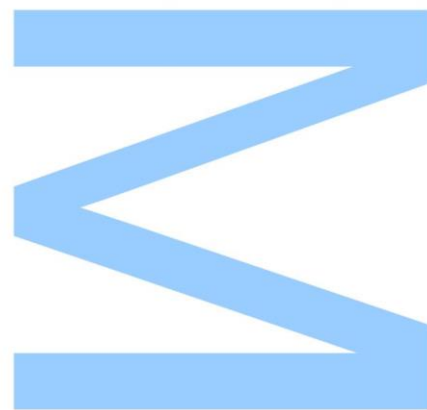




Todas as correções determinadas pelo júri, e só essas, foram efetuadas.

O Presidente do Júri,

Porto, ____/____/____



Agradecimentos

Quero desde já agradecer à Professora Joana Fernandes e à Professora Clara Lázaro por me transmitirem o gosto pela altimetria por satélite. Ainda à Professora Joana Fernandes por todo o acompanhamento, confiança, explicações, motivação e pela leitura crítica da versão prévia deste trabalho.

Quero também agradecer aos meus amigos e colegas Eliana, Telmo e Nélson pelo companheirismo, apoio e colaboração na elaboração deste trabalho final.

Por fim, quero agradecer aos meus pais pela confiança depositada em mim durante o meu percurso académico.

Resumo

A altimetria por satélite permite o estudo da variabilidade do nível do mar em oceano aberto e em zonas costeiras à escala global. As medidas efetuadas em zonas costeiras são afetadas pela contaminação terra na medida do altímetro radar, na medida do radiómetro de micro-ondas devido aos erros atmosféricos associados, nomeadamente da componente húmida da troposfera, e aos erros dos modelos globais de maré. Estas correções são necessárias para obter medidas precisas de *Sea Level Anomaly* (SLA), a variável mais usada no estudo do nível do mar. Por isso, o objetivo deste trabalho incidiu na avaliação de produtos altimétricos melhorados junto à costa, nomeadamente medidas altimétricas processadas usando um novo algoritmo de *retracking*, aplicado nas zonas costeiras às missões altimétricas Envisat e Jason-2, para a região da Indonésia. Em conjunto com estas medidas altimétricas foram avaliadas várias correções da componente húmida da troposfera e modelos de maré oceânica. Foram feitas análises temporais e espaciais de diferenças de variância de um conjunto de SLA, obtidos usando os diferentes produtos altimétricos. Foi também determinada a diferença de variância da SLA nos pontos de cruzamento dos traços do satélite, designados por *crossovers*. Para quantificar a variação do nível do mar, foi utilizado o método STL (*Seasonal-Trend decomposition procedure based on Loess*) de forma a decompor a série temporal nas suas componentes principais. Os resultados deste estudo demonstram que o algoritmo de cálculo da componente húmida da troposfera GPD+ (*GNSS-derived Path Delay Plus*) apresenta as melhores correções nas zonas costeiras para as duas missões altimétricas. Verificou-se ainda que o modelo de maré GOT4.10 apresenta melhores resultados para a missão Envisat. Já para a missão Jason-2, nas zonas junto a costa, o modelo FES2012 apresenta melhores correções. O mesmo se concluiu na análise espacial de variância nos *crossovers*, exceto para a missão Jason-2 devido às características desta missão. Por fim, usando as medidas do satélite Jason-2 verificou-se que o nível do mar na Indonésia aumentou na ordem dos 6.2 mm/ano no período de 2009 até 2014. Os valores obtidos são concordantes com análises semelhantes para a região da Indonésia.

Abstract

Satellite altimetry allows the study of sea level variation in open ocean and in coastal zones at global scale. The measurements in coastal zones are degraded due to land contamination in the altimeter footprint, through interference with the radar signal. Some geophysical corrections such as ocean tides from global tide models are not suitable for coastal dynamics and the measurements from the on-board microwave radiometer are contaminated by land, thus degrading the wet tropospheric correction derived from these measurements. All these corrections are essential to determine precise *Sea Level Anomaly* (SLA), the variable most commonly used in sea level studies from satellite altimetry.

Therefore, the objective of the study is to evaluate the performance of a set of altimetry products in coastal zones using data from the altimetry missions Envisat and Jason-2 in the Indonesian region. Altimeter data from a new retracking algorithm, various wet tropospheric corrections and ocean tide models were evaluated.

Each altimetry product was assessed by statistical analyses of SLA variance, both along track, cycle by cycle, and at crossovers.

Finally, to quantify the sea level change in the study region the STL (*Seasonal-Trend decomposition procedure based on Loess*) method was applied in order to decompose the SLA time series in its main components.

The results show that the GPD+ (GNSS-derived Path Delay Plus) algorithm for computing the wet tropospheric correction (WTC) features the best WTC in the Indonesian region both for Envisat and Jason-2 altimetry missions. It was also demonstrated that the tidal model GOT4.10 presents better results for the Envisat mission than for Jason-2, for which the tidal model FES2012 presents better results in the areas along the coast. The same results were obtained in the crossover analysis, except for the Jason-2 mission due to its characteristics. In the last analysis, the time series was generated and decomposed using STL. The linear fit of the inter-annual component allows the quantification of the *Mean Sea Level* (MSL) trend. Results show that, using Jason-2 data, MSL in the Indonesian region raised 6.2 mm/year during 2009 - 2014 which agrees with previous results for the same region.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	xi
Acrónimos	xii
1. Introdução	1
1.1. Objetivo do trabalho	3
1.2. Estrutura do trabalho	4
2. Conceitos teóricos	5
2.1. Altimetria por Satélite	5
2.2. Missões altimétricas	8
2.3. Sinal altimétrico e retracking	9
2.4. Modelos atmosféricos e correções atmosféricas	12
2.5. Dados utilizados	14
2.6. Metodologia	15
3. Análise temporal	18
3.1. Missão Envisat	19
3.2. Missão Jason-2	30
4. Análise Espacial	36
4.1. Diferenças de variância de SLA	36
4.2. Diferenças de variância nos pontos de crossover	41
5. Variação do nível do mar	50
6. Conclusão	54
Referências	57

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Espectro eletromagnético com indicação das diferentes bandas, com o detalhe dos comprimentos de onda existentes na região das micro-ondas [Fonte: AVISO].....	5
Figura 2.2 - Pegada do impulso gerado pelo altímetro e forma da onda (waveform) recebida pelo mesmo [Fonte: AVISO].	9
Figura 2.3 - Características da curva modelo para oceano aberto (Passaro, et al., 2014).	10
Figura 2.4 - Medidas obtidas pelo satélite altimétrico, com a introdução de ruído nas medidas nas zonas costeiras (Passaro et al., 2015)..	11
Figura 2.5 - Representação dos dados adquiridos no ciclo 10 da missão Envisat, para todo o globo, e extração para a zona de interesse.....	15
Figura 3.1 - Representação dos passes das missões altimétricas Envisat (verde) e Jason-2 (vermelho) para a Indonésia.....	18
Figura 3.2 - Variação de SLA_{REF} em centímetros para a região da Indonésia, usando os dados de referência da missão altimétrica Envisat.	19
Figura 3.3 - Histograma representativo da distribuição de frequência do range para os dados RADS (azul) e do ALES (laranja), para o ciclo 10 da missão Envisat.	20
Figura 3.4 – O modelo ERA Interim (azul), o GPD (preto), a Composite (magenta) e MWR (vermelho) por passe do ciclo 10 em função da latitude para a zona de estudo. À esquerda: Variação da WTC em metros para o passe 6. À direita: Variação da WTC em metros para o passe 148.	20
Figura 3.4 – O modelo ERA Interim (azul), o GPD (preto), a Composite (magenta) e MWR (vermelho) por passe do ciclo 10 em função da latitude para a zona de estudo. À esquerda: Variação da WTC em metros para o passe 6. À direita: Variação da WTC em metros para o passe 148.	20
Figura 3.5 - Representação da interpolação para ERA Interim (ciano) e o valor original (azul) para o passe 21 em função da latitude (gráfico da esquerda); Ampliação do gráfico da esquerda com Era Interim interpolado (ciano) e ERA Interim original (azul), no gráfico da direita.....	21
Figura 3.6 - Variância da WTC ERA Interim da missão Envisat para a região em estudo para cada ciclo da missão Envisat.	22
Figura 3.7 - Diferenças de variância entre SLA_{RGP} e SLA_{REF} para cada ciclo da missão Envisat.....	23

Figura 3.8 - Diferença de variância de SLA_{AGP} e SLA_{RGP} para cada ciclo da missão Envisat.....	23
Figura 3.9 - Gráfico da esquerda: Diferença de variância entre SLA_{AGP} e SLA_{AComp} para cada ciclo da missão Envisat. Gráfico da direita: Demonstração dos pontos inválidos (a vermelho) e dos pontos válidos (a azul) da correção Composite para o ciclo 10 do Envisat, para a região da Indonésia.....	24
Figura 3.10 – Diferenças de variância entre SLA_{RFE} e $SLA_{REF(GOT)}$ para cada ciclo da missão Envisat.....	25
Figura 3.11 - Média das diferenças de variância de SLA usando a WTC ERA, GPD e Composite aplicadas aos dados RADS (gráfico da esquerda) e as diferenças de variância de SLA utilizando as mesmas WTC aplicadas usando os dados ALES (gráfico da direita) em função da distância à costa, para a missão Envisat.	26
Figura 3.12 – Média das diferenças de variância entre o modelo ERA Interim e o algoritmo GPD usando o range do produto RADS (a azul) e usando o range do produto ALES (a vermelho).	26
Figura 3.13 – Gráfico da esquerda: Média das diferenças de variância da SLA entre o modelo FES e o modelo GOT para dados RADS (azul) e ALES (vermelho). Gráfico da direita: Variância da SLA_{AER} (azul) e da SLA_{AFE} (vermelho) em função da distância à costa.....	27
Figura 3.14 - Variação o nível médio do mar para a zona da Indonésia entre 2009 - 2015, obtidos pela missão Jason-2.....	30
Figura 3.15 - Variação do ERA Interim (azul), GPD (preto) e MWR (vermelho) por passe do ciclo 10 em função da latitude para a zona de estudo, usando dados do Jason-2. À esquerda: Variação da WTC em metros para o passe 53. À direita: Variação da WTC em metros para o passe 99.	31
Figura 3.16 - Variância do modelo ERA Interim para cada ciclo da missão J2 na região da Indonésia.	31
Figura 3.17 - Diferenças de variância entre SLA_{RGP} e SLA_{REF} (gráfico da esquerda) e SLA_{AGP} e SLA_{RGP} (gráfico da direita) para cada ciclo da missão Jason-2.....	32
Figura 3.18 – Diferença de variância entre SLA_{AFE} e $SLA_{AER(GOT)}$ para a missão Jason-2 na zona da Indonésia.....	32
Figura 3.19 – Gráfico da esquerda: Diferenças de variância de SLA entre a correção atmosférica GPD e ERA para os dados RADS (a azul) e para os dados ALES (a vermelho). Gráfico da direita: Variância de SLA obtida usando a correção GPD para o range do produto RADS (azul) e do produto ALES (vermelho).	33

Figura 3.20 – Gráfico da esquerda: Diferença de variância entre os modelos de maré FES e GOT, usando o range do produto RADS (azul) e do produto ALES (vermelho). Gráfico da direita: Variância de SLA_{RFE} (a azul) e SLA_{AFE} (a vermelho) em função da distância à costa.	34
Figura 4.1 - Diferença de variância da SLA_{RGP} e SLA_{REF} para os ciclos 10-94 Envisat para a região da Indonésia	37
Figura 4.2 - Diferença entre SLA_{RFE} e SLA_{REF} , para os ciclos 10 - 94 da missão Envisat para a região da Indonésia.	37
Figura 4.3 - Diferença de variância entre SLA_{AER} e SLA_{REF} para os ciclos 10-94 do Envisat na região da Indonésia.....	38
Figura 4.4 - Diferença de variância entre SLA_{RGP} e SLA_{REF} para os ciclos 1-252 do Jason-2 na região da Indonésia.....	39
Figura 4.5 - Diferença de variância entre SLA_{RFE} e $SLA_{RER(GOT)}$ para os ciclos 1-252 do Jason-2 na região da Indonésia.....	39
Figura 4.6 - Diferença de variância entre SLA_{AER} e SLA_{REF} para os ciclos 1-252 do Jason-2 na região da Indonésia.....	40
Figura 4.7 – Variação espacial da diferença de variância nos pontos de crossovers para SLA_{RGP} e SLA_{REF} usando os ciclos 10 - 94 do Envisat, numa grelha $4^{\circ} \times 4^{\circ}$	41
Figura 4.8 - Variação espacial da diferença de variância nos pontos de crossovers da SLA_{RGP} e da SLA_{REF} usando os ciclos 10 - 94 do Envisat numa grelha $3^{\circ} \times 3^{\circ}$	42
Figura 4.9 - Variação espacial da diferença entre SLA_{RFE} e SLA_{REF} usando os ciclos 10-94 do Envisat numa grelha $4^{\circ} \times 4^{\circ}$	43
Figura 4.10 - Variação espacial da diferença entre SLA_{RFE} e SLA_{REF} usando os ciclos 10-94 do Envisat numa grelha $3^{\circ} \times 3^{\circ}$	43
Figura 4.11 - Variação espacial da diferença entre SLA_{AER} e SLA_{REF} usando os ciclos 10-94 do Envisat numa grelha $4^{\circ} \times 4^{\circ}$	44
Figura 4.12 - Variação espacial da diferença entre SLA_{AER} e SLA_{REF} usando os ciclos 10-94 do Envisat numa grelha $3^{\circ} \times 3^{\circ}$	44
Figura 4.13 - Variação espacial da diferença entre SLA_{AGP} e SLA_{REF} usando os ciclos 10-94 do Envisat numa grelha $4^{\circ} \times 4^{\circ}$	45
Figura 4.14 - Variação espacial da diferença entre SLA_{AGP} e SLA_{REF} usando os ciclos 10-94 do Envisat numa grelha $3^{\circ} \times 3^{\circ}$	45
Figura 4.15 - Variação espacial da diferença entre SLA_{RGP} e SLA_{REF} usando os ciclos 1-252 do Jason-2 numa grelha $4^{\circ} \times 4^{\circ}$	46
Figura 4.16 - Representação do número de pontos de crossover utilizados para a análise da missão Jason-2.....	47

Figura 4.17 - Variação espacial da diferença entre SLA_{RFE} e $SLA_{RER(GOT)}$ usando os ciclos 1-252 do Jason-2 numa grelha $4^{\circ} \times 4^{\circ}$.	47
Figura 4.18 - Variação espacial da diferença entre SLA_{AER} e SLA_{REF} usando os ciclos 1 - 252 do Jason-2 numa grelha $4^{\circ} \times 4^{\circ}$.	48
Figura 4.19 - Variação espacial da diferença entre SLA_{AGP} e SLA_{RGP} usando os ciclos 1-252 do Jason-2 numa grelha $4^{\circ} \times 4^{\circ}$.	48
Figura 5.1 – Decomposição do sinal original (a preto) nas várias componentes obtidas através da análise STL: sinal anual (a vermelho), sinal interanual (a azul) e a soma do sinal anual com o sinal interanual (a roxo).	51
Figura 5.2 - Representação do sinal anual (a vermelho), tendência (a azul) e ajuste da tendência (a preto).	51
Figura 5.3 - Decomposição do sinal original (a preto) dadas pelo STL: sinal anual (a vermelho), sinal interanual (a azul) e a soma do sinal anual com o sinal interanual (a roxo).	52
Figura 5.4 - Representação do sinal anual (a vermelho), tendência (a azul) e ajuste da tendência (a preto).	52

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Características das missões altimétricas Envisat e Jason-2 usadas neste trabalho.....	8
Tabela 3.1 - Variância para as SLA obtidos usando diferentes WTC para os ciclos 10 - 15 da missão Envisat.....	28
Tabela 3.2 - Variância para os SLA obtidos usando a WTC do modelo Composite para os ciclos 10-15 da missão Envisat.	28
Tabela 3.3 - Variância para as SLA obtidas usando os dois modelos de correção de maré FES e GOT para os ciclos 10-15 utilizados da missão Envisat.	29
Tabela 3.4 - Variância para as várias SLA obtidas para as WTC estudadas usando dados da missão Jason-2.	34
Tabela 3.5 - Variância do valor da SLA obtido para os dois modelos de correção de maré FES e GOT, usando os dados ALES e RADS.	35
Tabela 5.1 - Parâmetros de entrada usado no método STL de acordo com a série e recomendações de Cleveland, et al.	50

Acrónimos

ALES	Adaptive Leading Edge Subwaveform
AVISO	Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Data in Oceanography
CGDR	Coastal Geophysical Data Records
CNES	Centre National d'Études Spatiales
DEOS	Delaware Environmental Observing System
ECMWF	European Centre For Medium Range Weather Forecasting
ENVISAT	Environmental Satellite
ERA Interim	ECMWF Reanalysis Interim
ERS 1/2	European Remote Sensing
ESA	European Space Agency
EUMETSAT	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
FES	Finite Element Solution
GEOSAT	Geodetic Satellite
GOT	Goddard/Grenoble Ocean Tide
GPD	GNSS - derived Path Delay
ISRO	Indian Space Research Organization
LOWESS	Locally Weighted Regression
MJD	Modified Julian Date
MSS	Mean Sea Surface
MSL	Mean Sea Level
MSLA	Mean Sea Level Anomaly
MWR	Microwave Radiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NetCDF	Network Common Data Form
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PODAAC	Physical Oceanography Distributed Active Archive Center
RADS	Radar Altimetry Database System
SARAL	Satellite with ARgos and ALtika
SGDR	Sensor Geophysical Data Records
SLA	Sea Level Anomaly
SSH	Sea Surface Height
STL	Seasonal-Trend decomposition procedure based on Loess

SWH	Significat Wave Height
WTC	Wet Tropospheric Correction
ZWD	Zenith Wet Delay

Capítulo I

1. Introdução

A altimetria por satélite é uma técnica que tem como objetivo fornecer, a uma escala global, medidas rigorosas e precisas do nível do mar revolucionando a recolha tradicionalmente feita através do uso de marégrafos. Tem um papel importante como técnica oceanográfica permitindo estudar a variação do nível do mar a nível regional ou global. O nível do mar é uma variável bastante utilizada na monitorização ambiental e climática uma vez que traduz a variação da redistribuição de massa de água no planeta. As missões dedicadas a altimetria por satélite têm vindo a aperfeiçoar a qualidade e a precisão das suas medidas, mas ainda se deparam com vários obstáculos. As medidas recolhidas sofrem perturbações que têm de ser tidas em consideração sendo necessário aplicar correções. Essas correções são devidas a vários fenómenos tais como as correções de propagação do sinal quando este atravessa a atmosfera (correção da ionosfera, troposfera seca e húmida); a correção devido ao estado do mar (*sea state bias*) que depende das ondas e vento à superfície; as correções geofísicas para as marés tais como marés oceânicas, terrestres, maré do polo e da carga da maré (*ocean tide loading*); correções atmosféricas para resposta do oceano à dinâmica da atmosfera, que para baixas frequências se designa por *inverse barometer correction* e para altas frequências se designa por *dynamic atmospheric correction*. Muitas dessas correções são calculadas por organizações que as mantêm atualizadas e as disponibilizam para serem aplicadas a estudos altimétricos. De todas as correções atmosféricas existentes, as que dizem respeito à componente húmida da troposfera são de grande relevância, isto porque são difíceis de se prever. Das três correções atmosféricas, a que apresenta uma modelação mais difícil é a componente húmida da troposfera (*Wet Tropospheric Correction* – WTC) devido à sua grande variação espaço-temporal. Por este motivo, a forma mais precisa de modelar a WTC é através de medidas de instrumentos colocados a bordo dos satélites altimétricos, os radiómetros de micro-ondas (*Microwave Radiometer* – MWR).

Uma forma alternativa para modelar a WTC passa pelo uso de um modelo de previsão atmosférica global, como por exemplo o modelo ERA Interim que permite caracterizar a atmosfera ao longo do tempo.

As zonas costeiras apresentam uma maior necessidade de estudo uma vez que são zonas de maior risco ambiental devido às alterações climáticas colocando estas regiões em risco (Nicholls et al., 2010). Embora a altimetria por satélite tenha como principal objetivo de estudo o oceano, as zonas costeiras, pela sua importância socioeconómica são uma fonte de crescente interesse e estudo. No entanto, o uso de altimetria nestas zonas apresenta problemas específicos que têm de ser resolvidos, sendo presentemente foco de estudo e investigação.

Nas zonas costeiras o uso de altimetria por satélite encontra essencialmente três tipos de problemas: contaminação terra na medida do altímetro radar, contaminação terra na medida do MWR e consequente degradação da WTC determinada a partir das suas medidas e erros nos modelos globais de maré, pela dificuldade em modelar as condições locais (Fernandes et al., 2014).

Relativamente aos modelos de maré, sempre que possível devem ser usados modelos locais, que representem de forma mais fiel as condições da zona em estudo. Na ausência destes, devem ser usados os modelos globais que melhor representam as marés nas zonas costeiras.

A medida do altímetro radar degrada-se devido à presença de diferentes tipos de superfície dentro da pegada do altímetro. As leituras são assim contaminadas devido à existência de superfícies distintas com formas de onda igualmente distintas, interferindo assim com o sinal radar (Legeais et al., 2014). Deste modo, a forma da onda (*waveform*) afasta-se da forma da curva para uma onda oceânica, a curva de Brown, sendo por isso necessário aplicar às medidas algoritmos específicos de processamento ou *retracking* (Passaro et al., 2014).

Por outro lado, a presença de terra causa uma incorreta estimação da correção do atraso troposférico por parte do radiómetro de micro-ondas a bordo do satélite altimétrico. Estes instrumentos operam nas bandas entre os 18 - 40 GHz e o tamanho da pegada depende das características do instrumento, da altitude da órbita a que o satélite se encontra bem como da frequência em que operam. Como as pegadas apresentam um tamanho na ordem dos 20 - 45 km, à medida que o satélite se aproxima das zonas costeiras, as leituras são contaminadas sendo em grande parte rejeitadas o que leva à diminuição da quantidade e da qualidade das mesmas em estudos nestas zonas. Com o objetivo de gerar correções da troposfera húmida melhoradas junto a

costa, minimizando os efeitos de contaminação terra nas medidas do MWR, vários algoritmos têm sido desenvolvidos. Por exemplo, a correção *Composite* utiliza um método simples consistindo na substituição das medidas do radiómetro micro-ondas (MWR - *Microwave Radiometer*) perto da costa, pelos valores dados pelo modelo ECMWF (Fernandes et al., 2013). Existe uma outra correção dada pelo algoritmo designado por GPD (*GNSS – derived Path Delay*). Este determina a correção da componente húmida da troposfera fazendo uma combinação de observações realizadas por estações GNSS costeiras, medidas válidas do radiómetro de micro-ondas (MWR) e de MWR de imagem.

Com o objetivo de se obter um algoritmo de *retracking* que melhore a qualidade das medidas em zonas costeiras, foi recentemente desenvolvido um novo método por Passaro et al., 2014. Este método, designado ALES (*Adaptive Leading Edge Subwaveform*) melhora a qualidade das medidas uma vez que utiliza parte do eco recebido e modela-o com a habitual expressão de Brown para oceano aberto, utilizando uma estimativa do método dos mínimos quadrados. Ao evitar o eco das diferentes superfícies, i.e., mar e terra, este método é capaz de recolher a maior parte do sinal quando este se encontra perto da costa, a uma distância cerca de 2 a 3 km. Com a adaptação da estimativa da altura da onda emitida pelo altímetro, a exatidão da recolha das medidas é mantida tal como acontece na recolha de dados em oceano aberto. Este algoritmo foi aplicado às medidas recolhidas pelas missões dos satélites Envisat, Jason-1, Jason-2 e SARAL/AltiKa, estando apenas disponíveis para análise os dados referentes às missões Envisat e Jason-2.

1.1. Objetivo do trabalho

O objetivo deste estudo incide na avaliação de um conjunto de produtos de altimetria por satélite, especialmente dedicados à melhoria das medidas altimétricas nas zonas costeiras. Estes produtos incluem medidas das missões altimétricas Envisat e Jason-2 a 18 Hz e 20 Hz, respetivamente, processadas usando o algoritmo de *retracking* ALES. É também avaliado o comportamento de um conjunto de produtos altimétricos relativos à correção da troposfera húmida e às marés oceânicas. O estudo é realizado na zona da Indonésia, por se tratar de uma zona com milhares de ilhas, sendo um laboratório natural para a altimetria costeira. A avaliação dos produtos é feita através de uma análise estatística de variância da SLA (*Sea Level Anomaly*) calculada usando as várias combinações das variáveis a utilizar, que dizem respeito ao *range*, às correções atmosféricas (WTC) e geofísicas (modelos de maré). Uma vez selecionados os produtos

mais indicados para a zona de estudo, é gerada uma série temporal de valores médios de anomalias do nível do mar (*Mean Sea Level Anomaly* - MSLA) para as missões estudadas e para a região da Indonésia.

Usando as diferentes correções aplicadas às medidas obtidas por altimetria por satélite, com este estudo pretende-se avaliar o contributo de cada um dos produtos e os seus benefícios para a quantificação da variação do nível médio do mar na zona da Indonésia. Este contributo será essencialmente avaliado nas zonas costeiras.

As análises de variância realizadas neste estudo são essencialmente de dois tipos: variância ao longo do traço *along-track* (médias por ciclo e função da distância à costa) e variância nos pontos de cruzamento dos traços, *crossovers*. Por fim, para quantificar a variação do nível do mar na região de estudo, é utilizado o método STL (*Seasonal-Trend decomposition procedure based on Loess*) de forma a decompor as séries temporais obtidas usando as correções que apresentam melhores resultados e quantificar a variação do nível do mar para a zona de estudo.

1.2. Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido por capítulos onde no primeiro está feito o enquadramento do estudo, o seu objetivo e a sua estruturação. No segundo capítulo é descrita a técnica da altimetria por satélite, bem como as missões utilizadas na realização deste estudo juntamente com a descrição dos produtos altimétricos utilizados e os conceitos teóricos acerca do método de *retracking* do produto ALES. No terceiro capítulo estão apresentados os resultados obtidos na análise temporal efetuada aos produtos e o seu contributo para o cálculo do valor da SLA na Indonésia. Já no capítulo seguinte, são apresentados os resultados obtidos na análise espacial onde são calculadas diferenças de variância da SLA nos *crossovers* para a região em estudo. Por fim, no quinto capítulo, é descrita a análise efetuada a duas séries temporais da SLA criadas para a zona da Indonésia, usando o método STL, de forma a determinar a variação do nível do mar para esta região. No último capítulo, estão apresentadas as conclusões retiradas deste trabalho juntamente com considerações para trabalho futuro.

Capítulo II

2. Conceitos teóricos

Neste estudo são abordados vários conceitos relacionados com altimetria por satélite, a técnica usada, as variáveis oceanográficas derivadas da altimetria, as missões realizadas bem como todas as componentes associadas à determinação do nível médio do mar e as correções utilizadas. Como se trata de um estudo comparativo, será abordada a origem dos dados utilizados, as suas diferenças e o seu contributo para a altimetria por satélite. Por fim, é descrita a metodologia a utilizar bem como as quantidades matemáticas usadas para a análise dos resultados obtidos.

2.1. Altimetria por Satélite

O princípio da altimetria por satélite consiste em medir a diferença de tempo existente entre o impulso gerado e emitido pelo altímetro, na direção nadiral da superfície terrestre e o eco produzido pela superfície refletora desse mesmo impulso, Δt . O altímetro é um

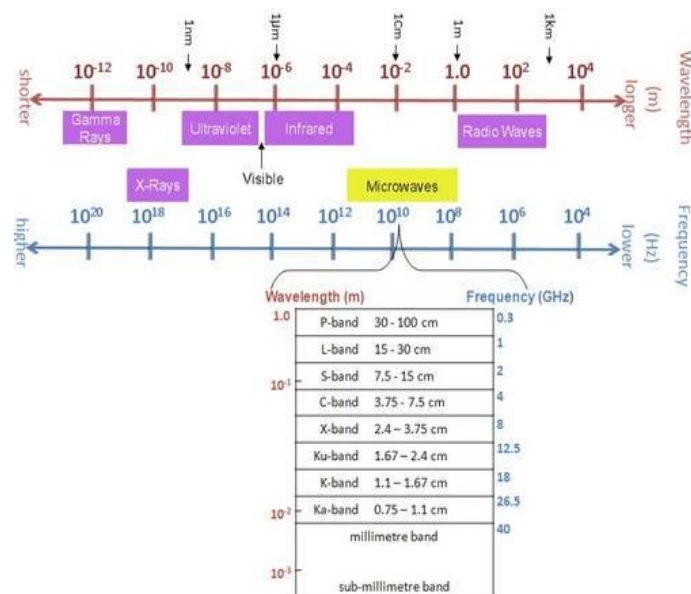


Figura 2.1 - Espectro eletromagnético com indicação das diferentes bandas, com o detalhe dos comprimentos de onda existentes na região das micro-ondas [Fonte: AVISO].

instrumento que opera na região das micro-ondas do espectro magnético (Fig. 2.1) nas frequências na ordem dos 13 GHz (banda Ku), capaz de efetuar medidas precisas dos ecos refletidos pela superfície (Chelton et al., 2001).

A distância medida entre o altímetro a bordo do satélite e a superfície terrestre, terra ou oceano é designada por *range* (R_{med}), e é obtida fazendo o produto da metade do intervalo de tempo do impulso emitido pelo valor da velocidade da luz no vazio, c (Equação 1).

$$R_{med} = \frac{1}{2} \Delta t \times c \quad (1)$$

Nos produtos de nível 2, as medidas obtidas pelo altímetro são fornecidas ao utilizador corrigidas de efeitos instrumentais passando pelo utilizador efetuar a correção devido aos efeitos atmosféricos, do estado do mar e geofísicos (ΔR), obtendo-se assim a distância corrigida (R), dada pela seguinte expressão (Equação 2) (Fernandes et al., 2014).

$$R = R_{med} - \Delta R \quad (2)$$

$$\Delta R = \Delta R_{dry} + \Delta R_{wet} + \Delta R_{iono} + \Delta R_{SSB} + \Delta R_{tides} + \Delta R_{DAC} + \Delta R_{RFO} \quad (3)$$

As correções geofísicas e atmosféricas aplicadas às medidas obtidas pelo altímetro incluem a correção da troposfera seca (*Dry Tropospheric Correction* - ΔR_{dry}), troposfera húmida (WTC – *Wet Tropospheric Correction* - ΔR_{wet}), correção da ionosfera (ΔR_{iono}), correções de maré (oceânica, carga da maré, marés terrestres e do polo) (ΔR_{tides}), do efeito barométrico inverso (*Dynamic Atmospheric Correction* - ΔR_{DAC}), *sea state bias* (ΔR_{SSB}) e desvio do sistema de referência (*Reference Frame Offset* - ΔR_{RFO}) (Equação 3) (Fernandes et al., 2014).

Conhecida a posição precisa do satélite num sistema de referência terrestre em qualquer instante, a altitude do satélite é conhecida relativamente ao elipsoide associado ao sistema (H). A altitude da superfície em estudo (h) relativamente a um determinado elipsoide, é então conhecida através da diferença entre a altitude elipsoidal do satélite e a medida obtida através do altímetro (Equação 4). As quantidades acima descritas encontram-se esquematizadas na Figura 2.2.

$$h = SSH = H - R_{med} - \Delta R \quad (4)$$

Neste trabalho a zona de estudo é o oceano, a altitude acima do elipsoide é designada por Altitude da Superfície Oceânica (*Sea Surface Height* - SSH), que é obtida para cada ponto ao longo do percurso do satélite. Obtendo esta medida ao longo de vários anos, é então determinada, para os mesmos pontos, a superfície média do oceano designada por Superfície Média Oceânica (*Mean Sea Surface* - MSS). Com a diferença entre estas duas quantidades descritas anteriormente, obtém-se a anomalia do nível do mar (*Sea Level Anomaly* - SLA) (Equação 5). Esta medida é utilizada para o estudo da variação do nível do mar ao longo do tempo.

$$SLA = SSH - MSS \quad (5)$$

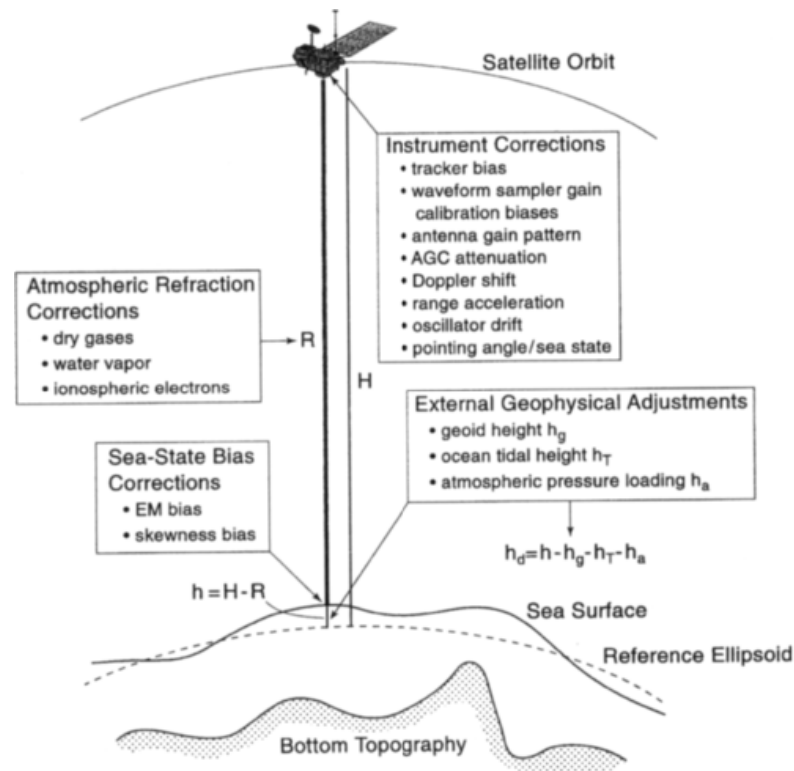


Figura 2.2 - Esquema sobre a determinação SSH (*Sea Surface Height*) através da diferença da distância satélite-superfície (R) e altitude do satélite relativamente ao elipsoide de referência (H) (Chelton et al., 2001).

2.2. Missões altimétricas

O início da altimetria deu-se nos anos 60, com o satélite SEASAT, lançado em 1978, e mais tarde o satélite GEOSAT (*Geodetic Satellite*) lançado em 1985. Em 1991 foi lançado o satélite ERS-1 (*European Remote Sensing*) por parte da ESA (*European Space Agency*), e mais tarde seguiu-se o satélite ERS-2 em 1995, Envisat em 2002. Em 2013 foi lançada a missão SARAL pelas agências ISRO (*Indian Space Research Organization*) e o CNES (*Centre National d'Études Spatiales*) que contém a bordo um altímetro designado por AltiKa a operar na banda Ka. Nestas missões, os satélites têm um ciclo de repetição de 35 dias, com uma inclinação de 98° e com uma altitude de 782-785 km (Tabela 2.1) (AVISO, s.d.).

Já por parte da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) juntamente com a agência CNES, desenvolveram o altímetro *Poseidon*, formando assim a missão TOPEX/Poseidon lançada em 1992, que mais tarde foi substituída pelo satélite Jason-1 em 2001, Jason-2 em 2008, e no ano 2016 foi lançado o Jason-3. Nesta última missão contribuíram as agências CNES, NASA, EUMETSAT (*European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites*) e a agência NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Os satélites destas missões apresentam uma altitude média de 1336 km, com uma inclinação de 66° e com um ciclo de repetição de 10 dias (Tabela 2.1) (AVISO, s.d.).

A altimetria por satélite em mar aberto é uma técnica já bem estabelecida que permite obter informação oceânica fundamental para os estudos de variação do nível do mar, como já mencionado neste trabalho o exemplo da variável SLA, obtendo precisões na ordem dos 2 cm. Quando é pretendido fazer os estudos da variação do mar nas zonas costeiras, esta técnica defronta certos obstáculos relacionados com as correções atmosféricas a serem aplicadas às medidas obtidas, mas também devido às grandes dimensões da pegada do altímetro fazendo com que nas zonas costeiras a pegada contém ecos de superfícies distintas. Para além disso, os modelos globais de maré oceânica podem ter grandes erros nestas zonas devido à dificuldade em modelar as condições locais (Passaro et al., 2014).

Tabela 2.1 - Características das missões altimétricas Envisat e Jason-2 usadas neste trabalho.

Missão	Envisat	Jason-2
Duração	2002 - 2010	2008 – 2015
Ciclo de repetição	35 dias	10 dias
Inclinação	98°	66°
Distância entre passes adjacentes no equador	80 km	315 km

2.3. Sinal altimétrico e *retracking*

Em altimetria por satélite é usado o princípio básico de uma medida radar. Um pulso de radiação com uma frequência conhecida é transmitido do satélite em direção ao mar, onde este pulso entra em contacto com a superfície oceânica e parte dessa radiação contida na pegada emitida, é refletida de volta para o altímetro a bordo do satélite. A pegada do impulso (*footprint*) é formada quando este intersecta a superfície oceânica produzindo uma área iluminada. A parte inicial do impulso entra em contacto com a superfície num primeiro instante, expande-se formando o que se assemelha a um círculo, e a parte final do impulso entra em contacto com a superfície oceânica num outro instante. Esse círculo, à medida que o impulso entra em contacto com a superfície transforma-se a partir de certo instante num anel (Fig. 2.2).

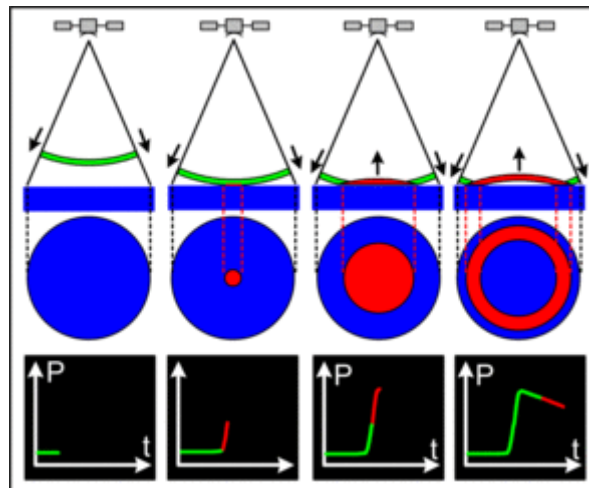


Figura 2.2 - Pegada do impulso gerado pelo altímetro e forma da onda (*waveform*) recebida pelo mesmo [Fonte: AVISO].

A altura medida é precisamente a que se refere ao instante imediatamente antes da formação do anel sendo esta dependente da altura das ondas à superfície. O altímetro recolhe amostras do sinal de retorno ajustando-o a uma curva modelo (Fig. 2.3). A forma da curva obtida depende do tipo de superfície que reflete o impulso recebido. A altura do altímetro relativamente à superfície refletora, quantidade medida, é a correspondente ao instante do ponto médio da frente crescente do impulso.

O declive do eco está diretamente relacionado com a altura das ondas (*Significan wave height* - SWH), a potência do eco é proporcional ao coeficiente de *backscatter*. Este está relacionado com a rugosidade da superfície, que por sua vez está relacionada com a velocidade dos ventos à superfície. Cada eco refletido é fortemente afetado por ruído *Rayleigh* (*Speckle*) que é devido à existência de várias reflexões dentro da mesma

pegada. Assumindo que o ruído nas *waveforms* consecutivas não está correlacionado, este pode ser reduzido através da média de um conjunto de *waveforms* antes de serem transmitidas. De forma a ser possível obter informação geofísica das *waveforms*, um processo designado por *retracking* tem de ser feito em terra. Este processo consiste em ajustar a resposta da onda a um modelo real da forma das ondas. Em oceano aberto, a maior parte das ondas são descritas de acordo com o modelo matemático Brown-Hayne que é usado como modelo principal nos processos de *retracking* para superfícies oceânicas (Bao et al., 2009). As formas de onda de acordo com o modelo matemático Brown-Hayne apresentam uma frente crescente bem acentuada com um lento decaimento (Fig. 2.3). O ponto médio escolhido é uma estimativa para a distância entre satélite e superfície oceânica (*range*) uma vez que é relativo à média da superfície oceânica medida na direção nadiral.

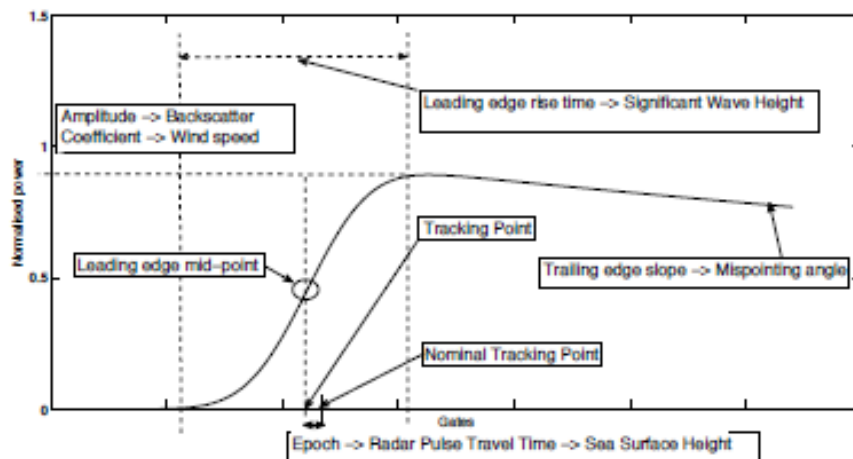


Figura 2.3 - Características da curva modelo para oceano aberto (Passaro, et al., 2014).

O ruído residual das *waveforms*, particularmente evidente ao longo do decaimento da onda, pode influenciar na recolha dos parâmetros de interesse que são utilizados no processo de *retracking*. Isto acontece precisamente nos pontos que se encontram a 10 km da costa. A esta distância, tanto as águas costeiras como a terra refletem ecos que alteram a forma da onda que é esperada obter para uma superfície homogênea. Vários estudos (Gomes-Enri et al., 2010; Tournadre, 2007; Scozzari et al., 2012) afirmam que tal acontece devido, por exemplo à existência de ilhas que fazem com que o coeficiente de *backscatter* aumente deformando assim a forma da onda (Fig. 2.4). Esses mesmos estudos afirmam que nas zonas costeiras existem manchas com elevada refletância não se tratando de um fenómeno constante e que está relacionado com o comportamento da maré, conjunto das cristas da maré ou das zonas de mar calmo. Estes efeitos

degradam a estimativa dos parâmetros geofísicos que são baseados no método de *retracking* de Brown-Hayne. Um método designado por *Adaptative Leading Edge Sub-waveform* (ALES), apresentado por *Passaro et al. (2014)*, que adapta o comprimento de uma *sub-waveform* de acordo com a altura das ondas (SWH) usando o modelo teórico de Brown-Hayne. Este método foi elaborado de forma a melhorar as medidas nas zonas costeiras, mas mantendo a precisão já obtida para oceano aberto. Permite obter resultados não tão bons quanto o método Brown-Hayne *retracker* nas *waveforms* que obedeçam ao modelo Brown-Hayne, mas apresenta melhores desempenhos para a vasta maioria das ondas afetadas por elevada refletância tal como em zonas perto da costa. Uma das vantagens do método ALES deve-se ao facto de não envolver mudanças no método de *retracking*. Apresenta bons resultados quando a zona de decaimento da onda está contaminada, mas onde a frente crescente do sinal é bem visível. Este método pode ser aplicado a várias ondas obtidas de diversos altímetros das missões altimétricas Envisat, Jason-1, Jason-2 e AltiKa (*Passaro et al., 2014*).

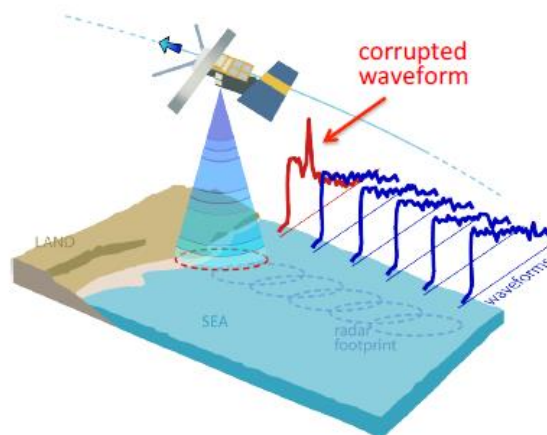


Figura 2.4 - Medidas obtidas pelo satélite altimétrico, com a introdução de ruído nas medidas nas zonas costeiras (*Passaro et al., 2015*).

2.4. Modelos atmosféricos e correções atmosféricas

Como já mencionado anteriormente, as medidas obtidas em altimetria por satélite necessitam de correções atmosféricas. Das correções atmosféricas existentes, destaca-se a correção da troposfera, estando esta dividida na correção da componente húmida (WTC) e correção da componente seca (DTC). A componente seca é responsável por 90% do atraso total e é modelada com elevada precisão (Fernandes et al., 2013). Já a componente húmida da troposfera, que apenas é responsável por 10% do atraso troposférico total, é de difícil modelação devido à sua grande variabilidade. Esta componente é composta por vapor de água e nuvens estando assim dependente das condições meteorológicas (Desportes et al., 2007). É então estimada recorrendo-se ao uso de radiómetros de micro-ondas (MWR) a bordo dos satélites altimétricos (Ablain et al., 2009). A precisão obtida está relacionada com a calibração do instrumento e com a sua deriva. A pegada do radiómetro tem tamanhos na ordem dos 20 a 30 km sendo bem maior que a pegada do altímetro, cerca de 4 -10 km. Consequentemente, as medidas do radiómetro ficam contaminadas à medida que o satélite altimétrico se aproxima da costa e como a pegada é maior que a do altímetro, logo estas ficam contaminadas acerca de 30 km da costa (Andersen et al., 2011). Esta é uma das limitações na aquisição de medidas nas zonas costeiras. É necessário ter também em consideração que as correções geofísicas que são utilizadas nas medidas em oceano aberto não podem ser as mesmas a ser aplicadas nas zonas costeiras, uma vez que a dinâmica da maré não é a mesma. Por último, as medidas efetuadas em zonas costeiras são insuficientes para ser possível detetar e assim distinguir marés costeiras (Passaro, 2015). Todas estas correções estão assim diretamente relacionadas com a precisão do cálculo da variação do nível do mar (MSL). Existem vários modelos de correção atmosférica que são bastante utilizados em estudos da variação do nível do mar ou mesmo em estudos comparativos de novas abordagens para solucionar estes problemas. O modelo ERA Interim é um produto de previsão meteorológica a nível global distribuído pelo ECMWF (*European Centre for Medium Range Weather Forecasts*), desde 1 de Janeiro de 1979, com parâmetros que descrevem as condições climáticas. Apresenta 4 análises por dia, às 0h, 6h, 12h e 18h UTC, e duas previsões de 10 dias por dia provenientes de análises às 0h e as 12 h UTC, com resolução espacial de 80 km com 60 níveis verticais desde a superfície até 0.1 hPa (Berrisford et al., 2011). O processamento das várias componentes da atmosfera, como por exemplo a temperatura, vento, humidade, ozono e pressão à superfície, a temperatura e humidade

perto da superfície terrestre cerca de 2 m, temperatura do solo, gelo e oceano, permitem fazer um modelo de previsão para o globo (Dee, et al., 2011).

Para além deste modelo para correção da troposfera húmida, vários algoritmos foram criados como por exemplo o designado por *Composite Correction* desenvolvido pelo AVISO (*Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Data in Oceanography*) que é um método que consiste na substituição das medidas do radiómetro micro-ondas (MWR - *Microwave Radiometer*) perto da costa, pelos valores dados pelo modelo ECMWF. São utilizadas técnicas de interpolação e remoção da tendência das medidas para os casos mais complexos (Fernandes et al., 2015).

Por fim, o algoritmo elaborado por *Fernandes, et al., 2010,2015* da Universidade do Porto designado por GPD (*Global Navigation Satellite System (GNSS) - derived Path Delay*) que calcula a correção da componente húmida da troposfera para as medidas de altimetria nas zonas costeiras, onde as leituras do radiómetro de micro-ondas são inválidas. Este método fornece uma estimativa para a correção juntamente com o erro associado, através da combinação dos valores dos atrasos troposféricos zenitais (*Zenith wet delay* - ZWD) obtidos através dos atrasos troposféricos de estações GNSS costeiras, das medidas válidas do radiómetro (MWR), de medidas de MWR de imagem (SI-MWR) de um conjunto de sensores a bordo de satélites de deteção remota e do modelo ECMWF.

Dos modelos de correções atmosféricas passamos agora para as correções que dizem respeito ao comportamento da maré. Existem vários modelos de maré, embora os mais utilizados sejam os descritos de seguida. Um modelo de maré é designado por FES2012 tratando-se de uma das mais recentes versões do FES (*Finite Element Solution*) desenvolvido em 2012. É um modelo hidrodinâmico global iniciado por Christian Le Provost no início dos anos 90. O modelo FES tira partido da grande quantidade de dados altimétricos, que melhoram o processamento do modelo e da precisão da batimetria. É um modelo baseado na resolução das equações de maré barotrópica numa configuração espectral (Lyard et al., 2006). Esta versão apresenta uma melhor solução das equações de maré quando comparado com os modelos FES2004 e GOT4.8, especialmente nas zonas costeiras e nas plataformas continentais. Este modelo têm uma resolução espacial de $1/16^\circ$ ($0.06^\circ \times 0.06^\circ$) em vez dos habituais $1/8^\circ$ ($0.125^\circ \times 0.125^\circ$) (Zawadzki et al., 2016).

Um outro modelo usado designado *Goddard/Grenoble Ocean Tide* – GOT é um modelo empírico criado por Richard Ray na NASA - *Goddard Space Flight Center* (Ray, 1999). É usado para remover a maré barotrópica dos dados altimétricos. Este modelo é

distribuído com as constantes harmónicas numa grelha de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. A partir deste modelo, a grelha é estendida até à linha de costa através da extrapolação do modelo original, mantendo os mesmos parâmetros que o modelo original (Ray et al., 2011).

2.5. Dados utilizados

Os dados a utilizar neste estudo provêm de duas bases de dados diferentes, ambas com o propósito de fornecer à comunidade científica a possibilidade da realização de projetos relacionados com altimetria por satélite com aplicação em várias áreas. Uma das bases de dados bastante utilizada pela comunidade científica designada por RADS (*Radar Altimeter Database System*) foi criada por DEOS (*Delaware Environmental Observing System*) em 2001 (Naeije et al., 2000). É uma plataforma de fácil acesso que contém os dados altimétricos de missões altimétricas já realizadas (Geosat, ERS1/2, Envisat, Topex/Poseidon, Jason1, Jason2, Geosat follow-on, Cryosat-2, SARAL) acompanhada por correções instrumentais, atmosféricas, de marés entre outras, a nível global com uma cadência de 1 Hz. Todas as medidas fornecidas são as mais recentes e daí o motivo da utilização dos dados provenientes desta base de dados (Naeije et al., 2007). Foram também descarregados dados referentes ao algoritmo ALES que podem ser descarregados através do Podaac (*Physical Oceanography Distributed Active Archive Center*) que pertence à NASA. Os dados ALES para cada missão encontram-se como CGDR (*Coastal Geophysical Data Records*), que são uma cópia do formato dos ficheiros que foram inicialmente processados na forma SGDR (*Sensor Geophysical Data Records*). Como contém a informação já existente nos ficheiros SGDR, foram adicionados os parâmetros estimados para o processo de *retracking* usando o modelo de *Brown*, e os resultados obtidos deste método. Por isso contém também as características da forma de onda, sigma 0 (*backscatter*), o valor da distância satélite-superfície (*range*) e a altura das ondas (SWH). Assim, o utilizador destes produtos tem a possibilidade utilizar tanto as quantidades obtidos pelo ALES como as já existentes nos produtos SGDR. Os dados referentes a este método estão a uma cadência de 18 Hz para a missão Envisat e de 20 Hz para a missão Jason-2, e apenas existem até 50 km da costa, o que corresponde a pontos com de 350 m. Os ficheiros encontram-se no formato NetCDF (*Network Common Data Form*) para ambas as bases de dados (Passaro et al., 2015).

A Indonésia é uma região caracterizada pela zona geográfica onde se encontra e pelos seus fenómenos geofísicos. Como se trata de um país composto por milhares de ilhas e bastante populacional, o aumento do nível do mar em todo o globo originará impactos

significativos nestas zonas, tais como erosão costeira, inundações e por consequência estragos devidos a fenómenos climáticos e também perda de ecossistemas existentes nas zonas costeiras. Todos estes impactos negativos irão afetar as populações nas áreas perto da costa, daí a importância do estudo da variação do nível do mar principalmente nas zonas costeiras, utilizando altimetria por satélite (Nurmaulia et al., 2010).

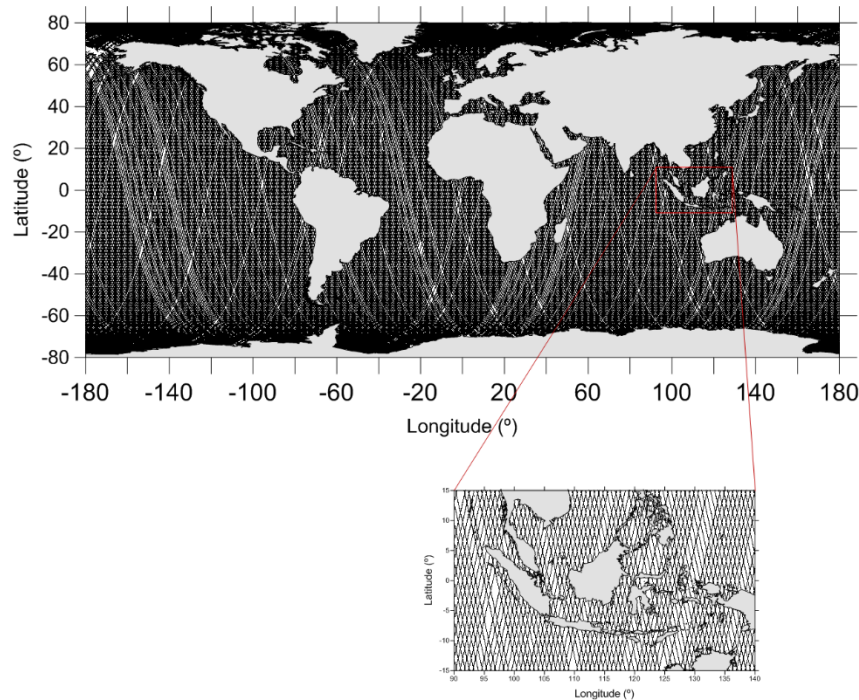


Figura 2.5 - Representação dos dados adquiridos no ciclo 10 da missão Envisat, para todo o globo, e extração para a zona de interesse.

2.6. Metodologia

Como se trata de um trabalho de avaliação de vários produtos altimétricos para as zonas costeiras é necessário utilizar quantidades matemáticas capazes de traduzir a sua contribuição na determinação da variação do nível do mar. Por isso, foi calculado um conjunto de valores de SLA, obtidos usando os diferentes modelos de correção atmosférica (ERA Interim, GPD e para o Envisat também a correção *Composite*), de marés (GOT4.10 e FES2012), o *range* do produto RADS e o *range* obtido por *retracking* do produto ALES. Assim, o valor da SLA de referência utiliza a correção atmosférica do modelo ERA Interim, o modelo de correção de maré GOT4.10 e o *range* do produto RADS.

$$SLA_{REF} = H - MSS - R - Wet_{ERA} - Dry_{ERA} - Iono_{GIM} - Tide_{GOT4.10} - Range_{RADS} - T_{Corr}, \text{ onde } T_{Corr} = \Delta R_{DAC} + \Delta R_{RFO} + \Delta R_{SSB} \quad (6)$$

São então calculados vários valores de SLA, fazendo combinações entre medidas dos modelos descritos acima utilizando as seguintes expressões:

$$SLA_{AER} = SLA_{REF} + Range_{RADS} - Range_{ALES} \quad (7)$$

$$SLA_{RGP} = SLA_{REF} + Wet_{ERA} - Wet_{GPD} \quad (8)$$

$$SLA_{AGP} = SLA_{REF} + Wet_{ERA} - Wet_{GPD} + Range_{RADS} - Range_{ALES} \quad (9)$$

$$SLA_{RFE} = SLA_{REF} + Tide_{GOT4.10} - Tide_{FES2012} \quad (10)$$

$$SLA_{AFE} = SLA_{REF} + Tide_{GOT4.10} - Tide_{FES2012} + Range_{RADS} - Range_{ALES} \quad (11)$$

Foi também determinado para o Envisat um conjunto de valores de SLA obtido usando a correção *Composite*, utilizando as seguintes expressões:

$$SLA_{RComp} = SLA_{REF} + Wet_{ERA} - Wet_{Comp} \quad (12)$$

$$SLA_{AComp} = SLA_{REF} + Wet_{ERA} - Wet_{Comp} + Range_{RADS} - Range_{ALES} \quad (13)$$

Por isso, ao longo deste estudo é bastante utilizada a variância que retrata a variabilidade dos dados indicando o quão longe do valor esperado se encontra o valor da variável aleatória em estudo. São então determinadas as diferenças de variância dos diferentes conjuntos de valores de SLA, obtidos usando as expressões acima, sendo assim determinado quais os produtos que apresentam menor variância.

Para analisar os dados espacialmente foi utilizado um algoritmo que utiliza os pontos de cruzamento dos passes, designado por *crossovers*. Este algoritmo é utilizado para remover erros de órbita e permite fazer o estudo da variabilidade oceânica (Tai, 1989). Basicamente este método encontra os pontos de cruzamento entre passes para cada ciclo de uma missão altimétrica, organiza-os em passes ascendentes e descendentes, determina o tempo de passagem no equador e a longitude para cada passe. Nesta fase é necessário que os dados possam ser organizados em vetores, ou seja, por exemplo que cada latitude dos passes possa formar um vetor. Isto para que o algoritmo possa fazer uma pesquisa para encontrar os pontos mais próximos de acordo com a diferença de tempo entre os dados do mesmo passe. Para além de se fazer o estudo usando o algoritmo dos pontos de *crossover* para cada missão, o mesmo pode ser feito usando duas missões sendo uma delas uma missão de referência. Em ambos os casos, são

definidos parâmetros para a determinação dos *crossovers* como por exemplo o número de ciclos a utilizar, a diferença máxima entre os pontos de *crossovers* obtidos (inicialmente colocado como 10 dias), e por fim o espaçamento da grelha de acordo com os valores iniciais. Este algoritmo utiliza um conjunto de sub-rotinas tendo sido tudo implementado em *Fortran90*.

Para quantificar a variação do nível do mar na região de estudo, foi utilizado um método designado por STL (*Seasonal-Trend decomposition procedure based on Loess*) com o objetivo de decompor uma série de forma a determinar a componente sazonal e interanual de forma robusta não influenciada por valores atípicos (*outliers*) nos dados originais (Cleveland et al., 1990). Este método consiste numa sequência de operações de suavização, sendo necessário definir os parâmetros de entrada, que devem ser adequados aos dados usados, sendo os mais importantes:

- a. n_p – período da componente sazonal, ou seja, número de observações que definem a componente sazonal;
- b. n_s – dimensão do filtro de suavização da componente sazonal;
- c. n_t – parâmetro de suavização da componente interanual, em geral tem de estar compreendido entre $1.5 \times n_p$ e $2.0 \times n_p$;
- d. n_o – número de iterações para um ajuste robusto;
- e. n_i – número de atualizações das componentes tendência e sazonal.

Antes da decomposição usando o método STL, as séries são filtradas usando LOWESS (*Locally Weighted Regression*), de forma a filtrar o sinal de ~60 dias que se sabe existir na série gerada utilizando os dados provenientes da missão Jason-2. É escolhido um filtro de dimensão igual a 7 observações, correspondente a 70 dias para eliminar sinais com periodicidade inferior a 70 dias. Para aplicar este método foi utilizado um *package* também desenvolvido em linguagem *Fortran90*, disponibilizado ao público via Internet. Neste trabalho são utilizadas várias linguagens de programação e por isso foram utilizadas rotinas previamente criadas em *Fortran90*. Para a representação de grelhas obtidas foi utilizado o programa da *Golden Software*, *LCC* designado por *SurferTM* juntamente com o programa *Golden Software's ScripterTM* para criação de gráficos de uma forma mais eficiente, que está agrupada na rotina acima descrita elaborada em *Fortran90*. Na representação das séries temporais resultantes da decomposição usando o método STL foi utilizado o programa *Golden Software's GrapherTM*. A programação que desenvolvi para a leitura dos dados provenientes dos dois produtos ALES e RADS, para a análise temporal e para a criação das grelhas referentes à diferença de variância da SLA na análise espacial foi toda feita em linguagem *Matlab*.

Capítulo III

3. Análise temporal

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos das análises efetuadas as correções geofísicas nomeadamente às correções atmosféricas e correções de maré bem como a qualidade dos dados obtidos pelo método *retracking* e os seus contributos na aplicação da altimetria por satélite nas zonas costeiras, em particular na região da Indonésia. Como os dados provenientes do Podaac respeitantes ao produto ALES se encontravam em formato NetCDF, desenvolvi uma rotina em *Matlab* capaz de fazer a extração das variáveis necessárias para o estudo (data juliana modificada (mjd), latitude, longitude e a distância satélite-superfície (*range*)) para a região de interesse compreendida entre as latitudes 20° N a 20° S e longitudes 70° E a 160° E (Fig. 3.1). Foi igualmente desenvolvida uma outra rotina em *Matlab* de forma a selecionar as variáveis de interesse do produto RADS (mjd, latitude, longitude, *range*, correções geofísicas e o valor da SLA de referência) para a região pretendida.

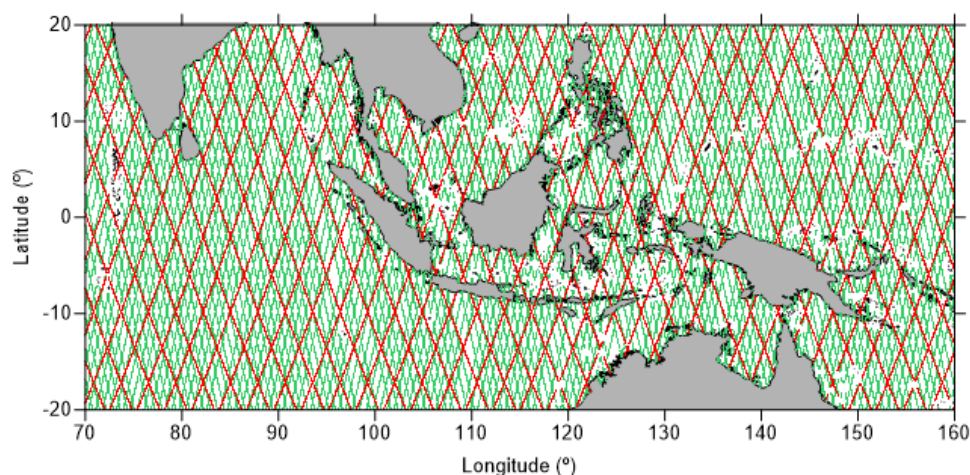


Figura 3.1 - Representação dos passes das missões altimétricas Envisat (verde) e Jason-2 (vermelho) para a Indonésia.

Com os dados organizados para a região pretendida, desenvolvi uma outra rotina em *Matlab* capaz de fazer a interpolação dos dados RADS para os pontos dos dados ALES. Uma vez que os dados ALES apresentam uma cadência de 18 Hz e 20 Hz para o Envisat

e Jason-2, respetivamente, esta interpolação será necessária para assim se poder avaliar a contribuição destes na altimetria por satélite principalmente para as zonas a 50 km da costa. Feito isto, desenvolvi um conjunto de rotinas usando a linguagem *Matlab* para analisar para cada ciclo de cada missão altimétrica, o comportamento das WTC e dos modelos de correção de maré.

Neste capítulo são ainda apresentados os resultados obtidos nas análises efetuadas ao comportamento das WTC para a missão Envisat e para a missão Jason-2. São também apresentados os resultados obtidos para a determinação do valor do nível médio do mar para a região em estudo utilizando os dados obtidos pelo método de *retracking* ALES e a sua comparação com os valores de referência, os dados RADS.

3.1. Missão Envisat

Com os valores obtidos para cada ciclo de referência desta missão altimétrica é calculada a média simples para cada ciclo, obtendo-se assim um valor médio da SLA_{REF} correspondendo a um valor de 35 em 35 dias, desde 2002 até 2010. Na figura 3.2 está representada a variação da SLA_{REF} para a zona em estudo usando os dados da missão altimétrica Envisat.

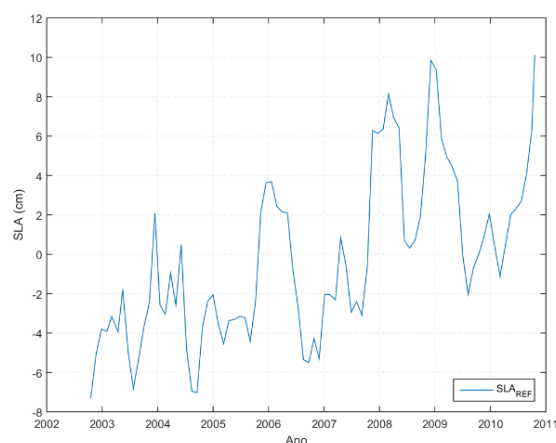


Figura 3.2 - Variação de SLA_{REF} em centímetros para a região da Indonésia, usando os dados de referência da missão altimétrica Envisat.

Como um dos objetivos deste trabalho é analisar o contributo dos valores obtidos pelo processo de *retracking* do método ALES, será utilizada a data juliana modificada (*mjd*) e o *range*. De forma a avaliar os valores do *range* presentes em ambas as bases de dados, decidiu-se fazer um histograma que representa a distribuição de frequências em

classes iguais estimando a distribuição de probabilidade dos dados, estando este representado na figura 3.3.

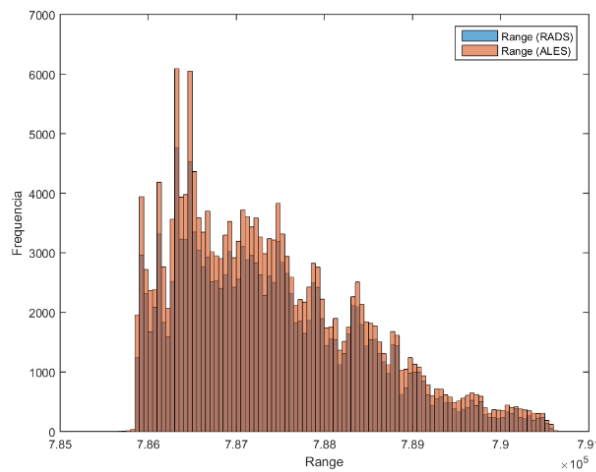


Figura 3.3 - Histograma representativo da distribuição de frequência do *range* para os dados RADS (azul) e do ALES (laranja), para o ciclo 10 da missão Envisat.

Pela análise ao histograma da figura 3.3, verifica-se que para o ciclo 10 os dados encontram-se enviesados à esquerda. Foi verificado o comportamento da correção da componente húmida da troposfera dada pelo modelo ERA Interim, pela correção *Composite*, pelo algoritmo GPD e o valor dado pelo MWR. Foi então utilizada uma rotina já existente, também em *Matlab*, capaz de representar a variação das correções atmosféricas por passe por ciclo de uma missão. Na figura 3.4 estão representados dois passes aleatórios (passe 6 e 148) para o ciclo 10 da missão Envisat para a zona de estudo.

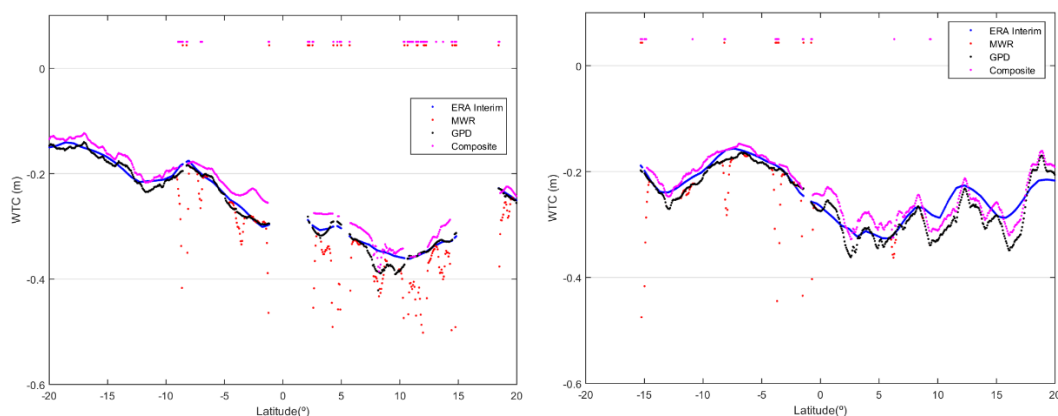


Figura 3.4 – O modelo ERA Interim (azul), o GPD (preto), a *Composite* (magenta) e MWR (vermelho) por passe do ciclo 10 em função da latitude para a zona de estudo. À esquerda: Variação da WTC em metros para o passe 6. À direita: Variação da WTC em metros para o passe 148.

Pelos gráficos da figura 3.4, observa-se que o modelo ERA Interim apresenta um comportamento mais suavizado quando comparado com os valores obtidos pelo radiómetro (MWR), pelo algoritmo GPD e correção *Composite*, eliminando o ruído presente nas medidas MWR devido à contaminação terra. Verifica-se ainda que alguns pontos da correção *Composite* apresentam valores inválidos, que se encontram com valores positivos tal como acontece com algumas medidas MWR. Tal como foi referido anteriormente, os dados do produto RADS encontram-se a 1 Hz, equivalente a uma medida por segundo, tendo sido necessário fazer a interpolação para a cadência de 18 Hz a que se encontram os dados ALES para assim avaliar a contribuição do método usado neste produto. Durante este processo foi verificado para o mesmo valor MJD do produto RADS e do produto ALES apresentam a mesma latitude e mesma longitude e por isso a interpolação dos dados a 1 Hz usando o MJD dos dados a 18 Hz será para o mesmo local, não existindo desfasamento entre dados. Procedeu-se então à interpolação dos valores do RADS passando agora a ter dados à cadência de 18 Hz. Feita a interpolação, foram criados ficheiros que contêm a interpolação para as medidas que se encontram entre 0 a 50 km da costa, uma vez que o método *retracking* apenas foi aplicado às medidas que se encontram a esta distância. Para as restantes medidas, ou seja, para as medidas que se encontram a distâncias superiores a 50 km da costa são utilizadas as medidas do produto RADS. Estes ficheiros finais tratam-se de uma combinação entre medidas a cadência de 18/20 Hz até 50 km da costa, e de cadência de 1 Hz para medidas de distâncias superiores, para cada ciclo das missões altimétricas em estudo. É demonstrada no gráfico da figura 3.5 a qualidade da interpolação para a correção ERA Interim.

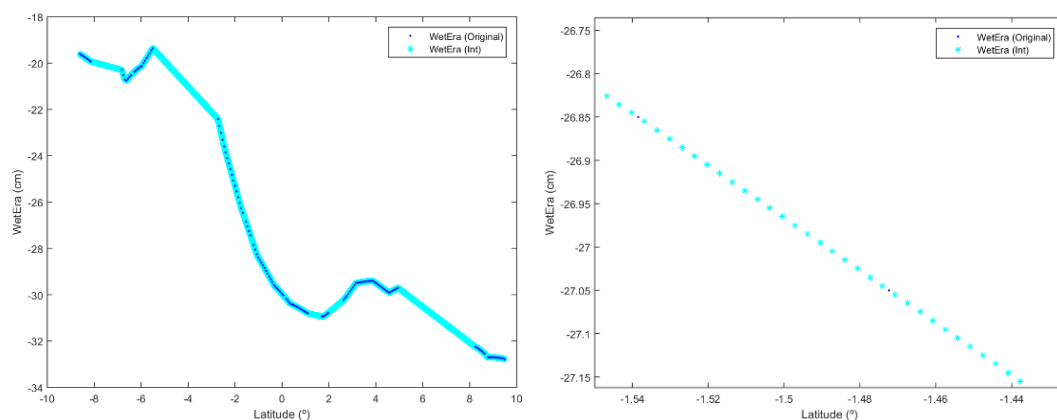


Figura 3.6 - Representação da interpolação para ERA Interim (ciano) e o valor original (azul) para o passe 21 em função da latitude (gráfico da esquerda); Ampliação do gráfico da esquerda com Era Interim interpolado (ciano) e ERA Interim original (azul), no gráfico da direita.

O mesmo foi feito para as restantes variáveis necessárias para o estudo, tais como o *range*, a correção GPD, o modelo *Composite*, os modelos de maré GOT e FES. De seguida, desenvolvi uma nova rotina em linguagem *Matlab* para obter a variância de cada WTC e para cada modelo de maré para cada ciclo da missão Envisat.

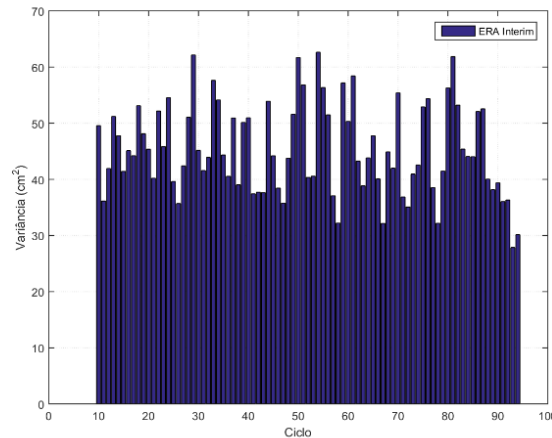


Figura 3.7 - Variância da WTC ERA Interim da missão Envisat para a região em estudo para cada ciclo da missão Envisat.

Pela figura 3.6 podemos observar que a variância do modelo ERA Interim encontra-se abaixo de 70 cm^2 . A mesma análise foi feita as restantes variáveis, tendo sido verificado que as diferenças entre as WTC são mínimas e impercetíveis quando representadas graficamente. O mesmo acontece quando se pretende fazer o mesmo estudo aos modelos de correção de maré GOT e FES. Por isso, para determinar o contributo de cada WTC, foram feitas as diferenças de variância entre os valores de SLA obtidas usando cada WTC e o valor da SLA de referência. Para tal foram utilizadas as equações descritas na secção 2.6 para obter os vários conjuntos de dados de SLA. Para efetuar as seguintes análises foram apenas tidos em consideração os valores absolutos de SLA de 2m, e foi adicionado às medidas do produto ALES um *bias* de -2 cm. Podemos então observar no gráfico da figura 3.7, as diferenças de variância entre o SLA obtido usando a correção GPD e a correção dada pelo modelo ERA Interim para cada ciclo da missão Envisat.

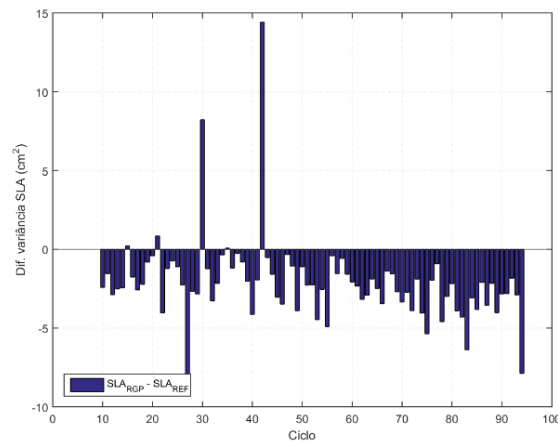


Figura 3.8 - Diferenças de variância entre SLA_{RGP} e SLA_{REF} para cada ciclo da missão Envisat.

Pelo gráfico da figura 3.7 verifica-se que as diferenças de variância de SLA são em média negativas, indicando que o GPD apresenta menor variância para os ciclos da missão Envisat, logo os valores do puro sinal dado pela SLA está corrigida de erros que as correções possuem, e por sua vez melhor do que a SLA determinada com o modelo ERA. Introduzindo agora o *range* do produto ALES (Eq. 7) determinaram-se as diferenças de variância entre os conjuntos da SLA_{AGP} e a SLA_{RGP} de forma a avaliar o contributo do *range* obtido usando o método *retracking* ALES. Estas diferenças são apresentadas no gráfico da figura 3.8.

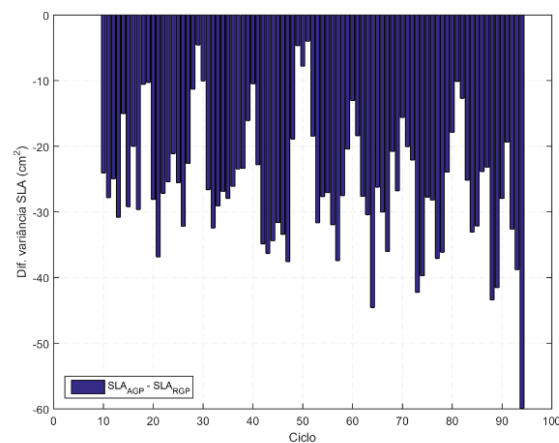


Figura 3.9 - Diferença de variância de SLA_{AGP} e SLA_{RGP} para cada ciclo da missão Envisat.

Pelo gráfico da figura 3.8 verifica-se que as diferenças de variância são negativas para todos os ciclos, demonstrando que o *range* dado pelo produto ALES contribui para a diminuição da variância no cálculo da SLA quando comparado com o *range* dado pelo produto RADS. Também foi utilizada a correção *Composite*, que foi utilizada no cálculo

da SLA_{AComp} (eq.12). Uma vez que foi verificado que o GPD é melhor que a correção ERA, é apenas apresentada na figura 3.9 a diferença entre a SLA_{AComp} e a SLA_{AGP} usando apenas dados ALES.

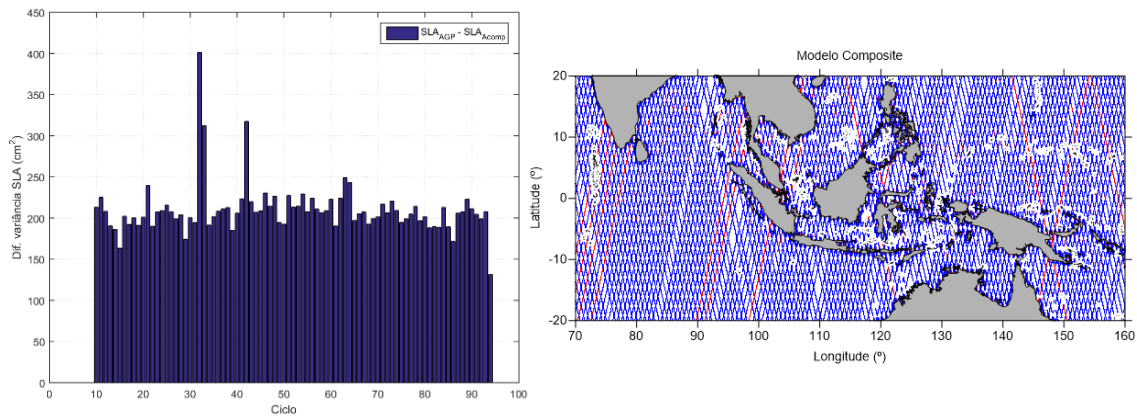


Figura 3.10 - Gráfico da esquerda: Diferença de variância entre SLA_{AGP} e SLA_{AComp} para cada ciclo da missão Envisat. Gráfico da direita: Demonstração dos pontos inválidos (a vermelho) e dos pontos válidos (a azul) da correção *Composite* para o ciclo 10 do Envisat, para a região da Indonésia.

Pelo gráfico da esquerda da figura 3.9, verifica-se que a SLA_{AComp} apresenta menor variância indicando assim que a correção *Composite* apresenta melhores resultados quando utilizado no cálculo do valor da SLA. No entanto, verifica-se que a correção *Composite* apresenta muitos valores inválidos o que influencia o cálculo da variância, como se pode observar, pelo gráfico da direita da figura 3.9, o número de pontos inválidos representados a vermelho para o ciclo 10 da missão Envisat. Observa-se ainda que muitos dos pontos inválidos se encontram perto da linha de costa. Por isso, para este caso, o estudo é inconclusivo.

Passando agora para as correções da maré, foi feito o mesmo procedimento para o cálculo das diferenças da variância da SLA. Foram assim obtidas as diferenças de variância entre a SLA_{RFE} e a SLA_{REF} , que se podem observar no gráfico da figura 3.10. Salienta-se o facto da SLA_{REF} e da SLA_{AER} utilizarem o modelo de correção de maré GOT, e as quantidades designadas por SLA_{RFE} e SLA_{AFE} utilizarem o modelo FES.

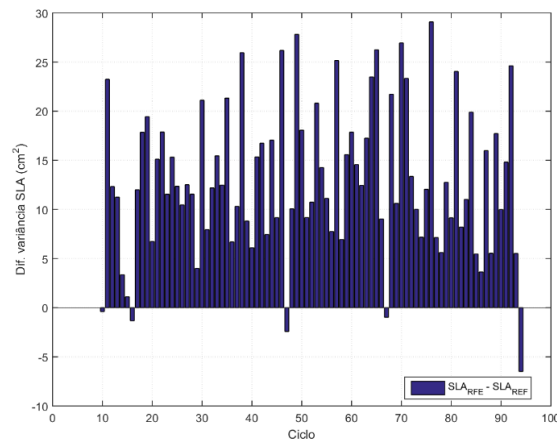


Figura 3.11 – Diferenças de variância entre SLA_{RFE} e $SLA_{REF(GOT)}$ para cada ciclo da missão Envisat.

No caso do modelo das marés, verifica-se que o modelo FES apresenta em média maior variância do que o modelo GOT para cada ciclo. Por isso conclui-se que o modelo GOT apresenta melhores resultados quando são analisados os valores da SLA obtidas para cada ciclo. O gráfico da figura 3.8 já demonstra que os dados ALES apresentam menor variância do que os dados RADS.

Uma vez que um dos objetivos deste trabalho consiste na avaliação do contributo dos dados obtidos usando o método *retracking* quando aplicado a altimetria por satélite especialmente nas zonas costeiras, procedeu-se à análise da qualidade dos dados perto da costa. Para tal, foi estudada a variação da diferença de variâncias da SLA, determinadas anteriormente, de acordo com a distância à costa. Os vários valores da SLA foram agrupados por classes de 3 km onde foi determinada a diferença de variância da SLA para cada classe de forma avaliar a contribuição de cada produto altimétrico. Foram então obtidos os gráficos da figura 3.11, representativos das diferenças da SLA obtidas para cada WTC e avaliadas para os dados RADS e para o produto ALES, em função da distância à costa para a região da Indonésia. Uma vez que a correção *Composite* apresenta valores inválidos, como comprovado pelo gráfico da direita da figura 3.9, foram obtidas as diferenças de variância da SLA para o conjunto de pontos onde a correção *Composite* é válida. Assim é possível analisar as três WTC utilizando o mesmo número de pontos.

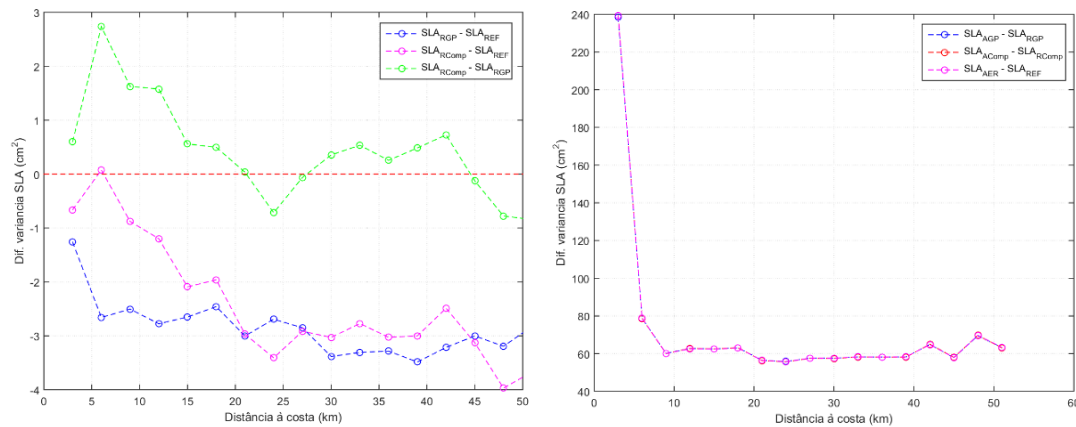


Figura 3.12 - Média das diferenças de variância de SLA usando a WTC ERA, GPD e *Composite* aplicadas aos dados RADS (gráfico da esquerda) e as diferenças de variância de SLA utilizando as mesmas WTC aplicadas usando os dados ALES (gráfico da direita) em função da distância à costa, para a missão Envisat.

Pelo gráfico da esquerda da figura 3.11, pode-se concluir que da três WTC estudadas em função da distância à costa, a SLA obtida com o algoritmo GPD apresenta menor variância para a região em estudo. Observa-se ainda que a correção *Composite* apresenta melhores resultados do que o modelo ERA Interim. Quando é utilizado o *range* do produto ALES, verifica-se que a variância aumenta, quando são utilizados apenas os pontos onde a correção *Composite* é válida. Isto demonstra que o subconjunto utilizado nesta análise, e como se tinha verificado no gráfico da figura 3.9, é constituído maioritariamente por pontos mais afastados da costa, onde o método de *retracking* não apresenta resultados significativos. Podemos agora verificar as diferenças de variância de SLA entre o modelo ERA Interim e o algoritmo GPD, usando os dados RADS e os dados ALES para o conjunto de pontos onde ambas as correções atmosféricas são válidas, representadas no gráfico da figura 3.12.

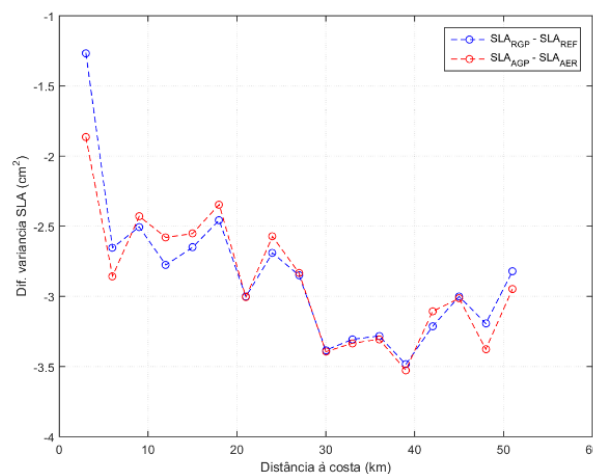


Figura 3.13 – Média das diferenças de variância entre o modelo ERA Interim e o algoritmo GPD usando o *range* do produto RADS (a azul) e usando o *range* do produto ALES (a vermelho).

Pelo gráfico da figura 3.12 pode-se concluir que a diferença do modelo ERA Interim e o algoritmo GPD são sempre negativas em função da distância a costa tanto para os dados RADS como usando o produto ALES. Isto indica que para as zonas costeiras o algoritmo GPD apresenta melhores resultados que o modelo ERA Interim. Pode-se concluir que para as zonas costeiras a WTC dada pelo algoritmo GPD e o *range* ALES contribuem para a diminuição da variância no cálculo do valor da SLA para as zonas costeiras da Indonésia.

Estudando os modelos de correção de maré, foi obtido o gráfico da esquerda da figura 3.13 representativo da diferença dos modelos de maré quando é utilizado o *range* do RADS e o *range* do ALES em função da distância à costa.

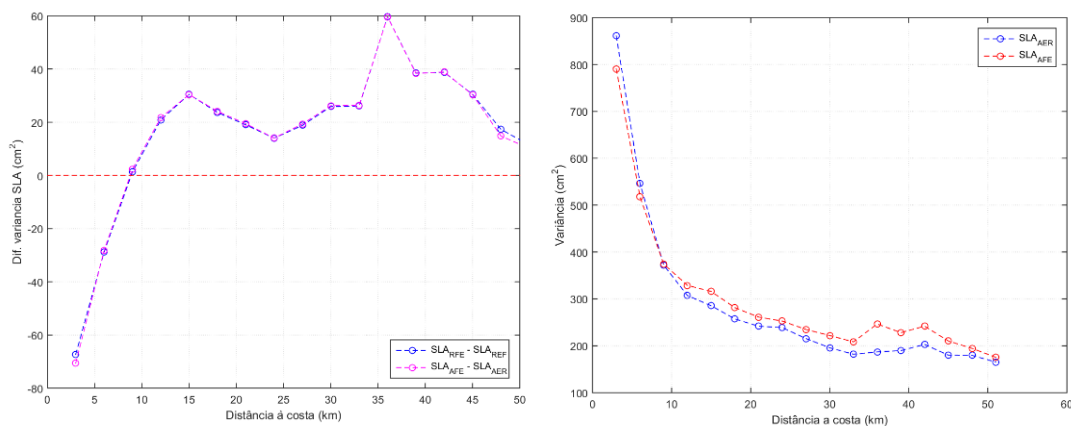


Figura 3.14 – Gráfico da esquerda: Média das diferenças de variância da SLA entre o modelo FES e o modelo GOT para dados RADS (azul) e ALES (vermelho). Gráfico da direita: Variância da SLA_{AER} (azul) e da SLA_{AFE} (vermelho) em função da distância à costa.

Para este caso, verifica-se que quando é feito o estudo dos modelos de maré a diferença dos modelos é quase igual para os produtos RADS e ALES. Além disso, verifica-se que as diferenças são negativas até aos 10 km da costa, indicando que a SLA obtida usando modelo de correção de maré FES apresenta menor variância para as medidas até esta distância da linha de costa. Pelo gráfico da direita figura 3.13, verifica-se que a SLA obtida usando o *range* do produto ALES apresenta menor variância até aos 10 km da costa quando é usado o modelo FES.

Com estas conclusões, podemos afirmar que os dados ALES contribuem para a diminuição da variância dos valores de SLA determinados usando as várias WTC (Fig. 3.12) e modelos de correção de maré para a região em estudo. Com isto, o valor estimado para a variação do nível médio do mar para esta região apresentará menor erro associado ao cálculo quando comparado com os valores obtidos usando os dados do RADS. É apresentado na tabela 3.1 um excerto de uma tabela de dados estatísticos

obtidos com o processamento dos dados das duas bases de dados para a missão Envisat.

Tabela 3.1 - Variância para as SLA obtidos usando diferentes WTC para os ciclos 10 -15 da missão Envisat.

Ciclo	Nº de pontos válidos	VAR SLA _{REF} (cm ²)	VAR (SLA _{AER}) (cm ²)	VAR (SLA _{RGP}) (cm ²)	VAR (SLA _{AGP}) (cm ²)
10	307835	282.54	259.43	278.68	254.61
11	304604	305.97	279.70	302.32	274.48
12	331449	308.90	284.80	305.07	280.13
13	287493	280.00	250.12	278.01	247.19
14	220471	253.72	239.58	249.71	234.67
15	211339	221.93	193.74	220.29	191.09

É também apresentado na tabela 3.2 a variância das SLA obtidas usando a correção *Composite* para as duas bases de dados RADS e ALES. Salienta-se o facto da diminuição do número de pontos utilizados para o cálculo da variância da SLA usando esta correção bem como o aumento da variância quando é usado o *range* do produto ALES, tal como se tinha verificado durante a análise desta correção em função da distância à costa.

Tabela 3.2 - Variância para os SLA obtidos usando a WTC do modelo *Composite* para os ciclos 10-15 da missão Envisat.

Ciclo	Nº de pontos válidos	VAR (SLA _{RCOMP}) (cm ²)	VAR (SLA _{ACOMP}) (cm ²)
10	305448	173.46	211.89
11	302061	180.21	225.15
12	328900	198.15	241.76
13	285276	167.96	211.01
14	219288	145.65	186.70
15	209935	124.95	155.54

Já para os valores da SLA obtidas usando os modelos de correção de maré são apresentados na tabela 3.3 os valores da variância, onde se verifica que os dados do ALES diminuem a variância para os dois modelos de correção de maré. Além disso, o modelo de correção de maré GOT apresenta menor variância quando comparado com o modelo FES tanto nos dados RADS como nos dados ALES, tal como se tinha observado anteriormente.

Tabela 3.3 - Variância para as SLA obtidas usando os dois modelos de correção de maré FES e GOT para os ciclos 10-15 utilizados da missão Envisat.

Ciclo	Nº de pontos válidos	VAR SLA _{REF(GOT)} (cm ²)	VAR SLA _{AER(GOT)} (cm ²)	VAR SLA _{RFE} (cm ²)	VAR SLA _{AFE} (cm ²)
10	307835	282.54	259.43	282.15	258.63
11	304604	305.97	279.70	329.21	300.44
12	331449	308.90	284.80	321.23	299.14
13	287493	280.00	250.12	291.25	264.34
14	220471	253.72	239.58	257.08	243.54
15	211339	221.93	193.74	223.05	197.11

3.2. Missão Jason-2

Como já foi mencionado anteriormente, o método de *retracking* foi também aplicado à missão Jason-2 para os ciclos 1 até 252, exceto para os ciclos 58 e 59. Apenas foram utilizados estes ciclos uma vez que o método *retracking* não foi, por enquanto, aplicado aos ciclos mais recentes nem aos dois ciclos 58 e 59. Procedeu-se ao mesmo tipo de análise para esta missão tendo sido analisado o modelo ERA e o algoritmo GPD, e os dois modelos de correção de maré. O conjunto de dados utilizados dizem respeito à interpolação efetuada para a região da Indonésia descrita na figura 3.1. Não foi avaliado o modelo *Composite*, uma vez que não é utilizado para esta missão. Foi obtido o valor da SLA para a zona de estudo tendo sido feita uma média por ciclo correspondente a um valor 10 em 10 dias entre 2009-2015 do nível médio do mar, representado no gráfico da figura 3.14.

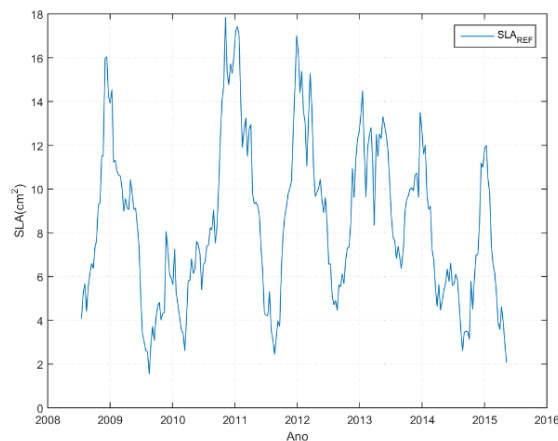


Figura 3.15 - Variação o nível médio do mar para a zona da Indonésia entre 2009 - 2015, obtidos pela missão Jason-2.

Verifica-se que a variação do nível médio do mar para este período é superior quando comparada como o período anterior embora à primeira vista não apresente tendência crescente. Foi também verificado o comportamento das WTC para dois ciclos da missão Jason-2, demonstrado no gráfico da figura 3.14. Tal como se tinha verificado na missão anterior, o modelo ERA apresentam uma suavização dos valores obtidos pelo radiómetro eliminando o ruído que este apresenta junto à costa.

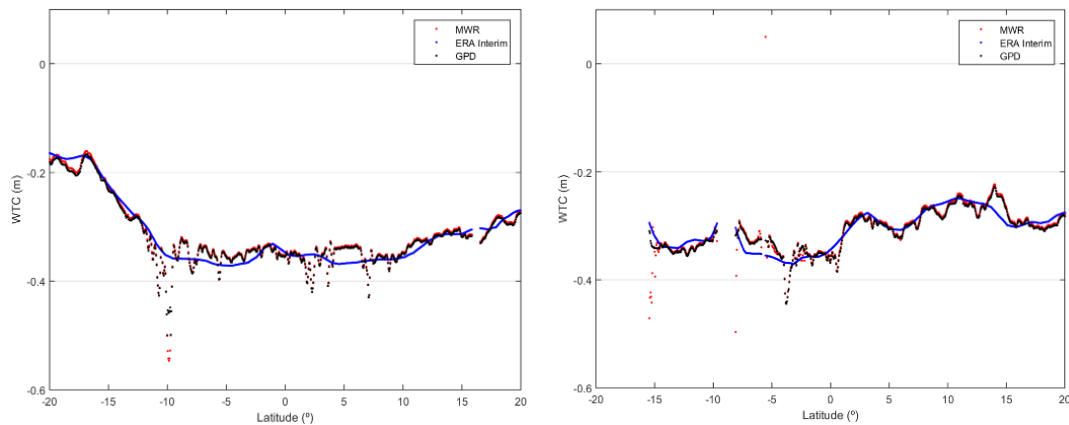


Figura 3.16 - Variação do ERA Interim (azul), GPD (preto) e MWR (vermelho) por passe do ciclo 10 em função da latitude para a zona de estudo, usando dados do Jason-2. À esquerda: Variação da WTC em metros para o passe 53. À direita: Variação da WTC em metros para o passe 99.

Foi verificada a ordem de grandeza da variância do modelo ERA Interim que se encontra representada no gráfico da figura 3.16. É de salientar que a falha existente neste gráfico, deve-se à inexistência dos ciclos 58 e 59 por parte do produto ALES. Verifica-se ainda que a variância do modelo ERA não excede os 70cm^2 para os ciclos 1 até 250 da missão Jason-2 na região da Indonésia, o mesmo acontecendo com algoritmo GPD.

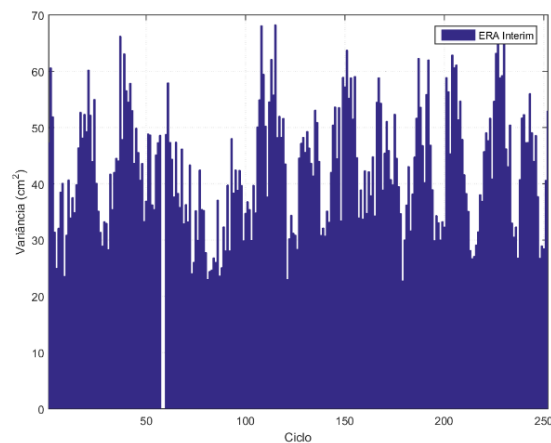


Figura 3.17 - Variância do modelo ERA Interim para cada ciclo da missão J2 na região da Indonésia.

Tendo observado as variâncias das WTC para cada ciclo, podemos calcular a diferença entre os conjuntos das SLA obtidas usando as duas WTC e a SLA de referência. Foi igualmente adicionado um *bias* às medidas do produto ALES de -1 cm. Está apresentada no gráfico da figura 3.17, a diferença de variância da SLA para se avaliar

qual a melhor WTC e por sua vez avaliar também o contributo dos dados obtidos por *retracking* do produto ALES.

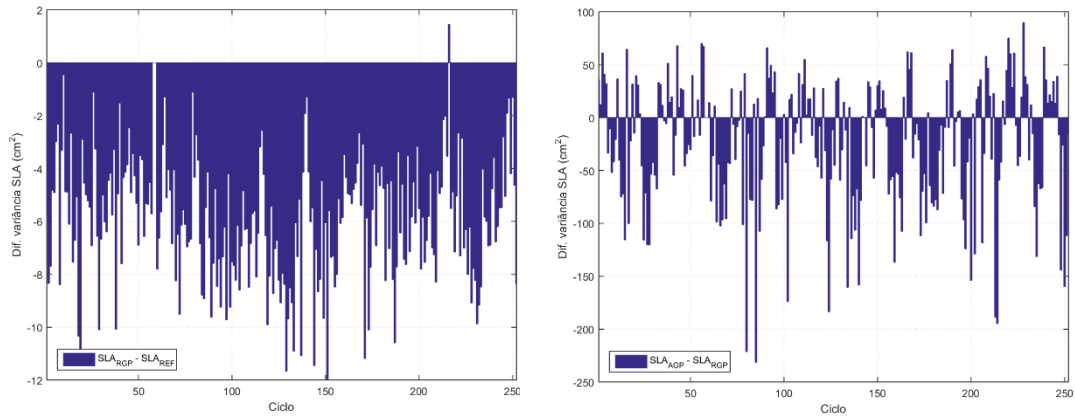


Figura 3.18 - Diferenças de variância entre SLA_{RGP} e SLA_{REF} (gráfico da esquerda) e SLA_{AGP} e SLA_{RGP} (gráfico da direita) para cada ciclo da missão Jason-2.

Pela observação do gráfico da esquerda da figura 3.17, verifica-se que a diferença de variâncias da SLA é maioritariamente negativa indicando uma vez mais que o algoritmo GPD apresenta melhores correções para o cálculo da SLA. Já quando são avaliados os dados provenientes dos produtos RADS e ALES (gráfico da direita da figura 3.17) verifica-se uma vez mais que os dados ALES contribuem para a diminuição da variância do valor da SLA nas zonas costeiras para a região de estudo. Para as correções de maré, estão representadas no gráfico da figura 3.18, as diferenças de variância da SLA quando são utilizados os modelos FES e GOT. Salienta-se novamente que a quantidade designada por SLA_{AER} utiliza o modelo de correção de maré GOT.

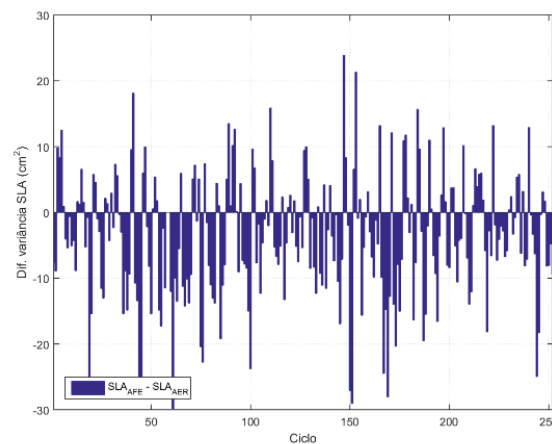


Figura 3.19 – Diferença de variância entre SLA_{AFE} e $SLA_{AER(GOT)}$ para a missão Jason-2 na zona da Indonésia.

Pela observação do gráfico da figura 3.18, pode-se afirmar que o modelo de maré GOT apresenta, em média, menor variância para o cálculo do valor de SLA para esta missão. Durante esta análise foi apenas utilizado o *range* do ALES, uma vez que as diferenças dos modelos se mantêm para o *range* das duas bases de dados.

Feito o estudo para cada ciclo da missão Jason-2 para a região da Indonésia, pretende-se avaliar a qualidade das WTC bem como do método *retracking* nas zonas costeiras. Procedeu-se ao cálculo das diferenças de variância entre os conjuntos SLA determinados anteriormente e o SLA de referência, em função da distância à costa. O gráfico da esquerda da figura 3.19 demonstra as diferenças de variância entre as correções atmosféricas usando o *range* dos dois produtos RADS e ALES.

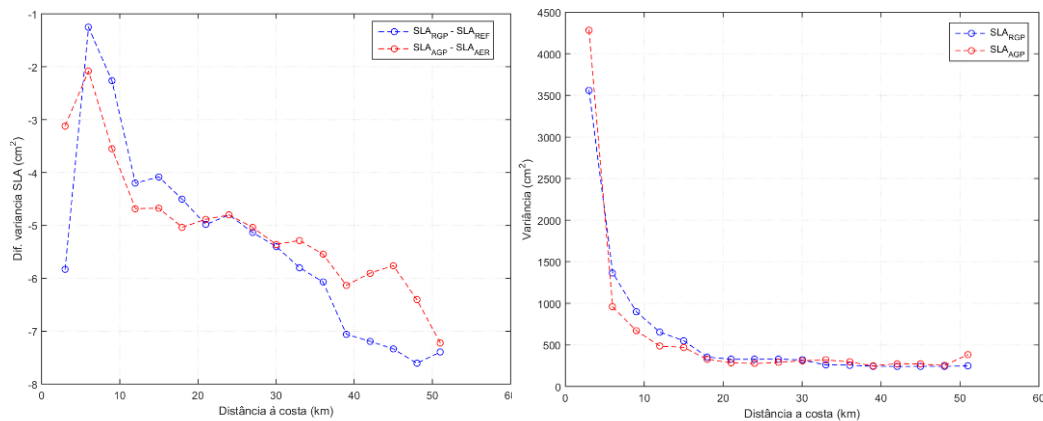


Figura 3.20 – Gráfico da esquerda: Diferenças de variância de SLA entre a correção atmosférica GPD e ERA para os dados RADS (a azul) e para os dados ALES (a vermelho). Gráfico da direita: Variância de SLA obtida usando a correção GPD para o *range* do produto RADS (azul) e do produto ALES (vermelho).

Podemos concluir que a SLA obtido usando a correção GPD apresenta em média menor variância o que por sua vez se traduz num valor de nível do mar obtido com menor erro associado. Com a introdução do *range* do produto ALES verifica-se que as diferenças entre as correções diminuem significativamente para os valores mais perto da costa, cerca de 20 km da costa. A mesma análise foi feita aos modelos de correção de maré em função da distância à costa, que se encontra representado no gráfico da figura 3.20.

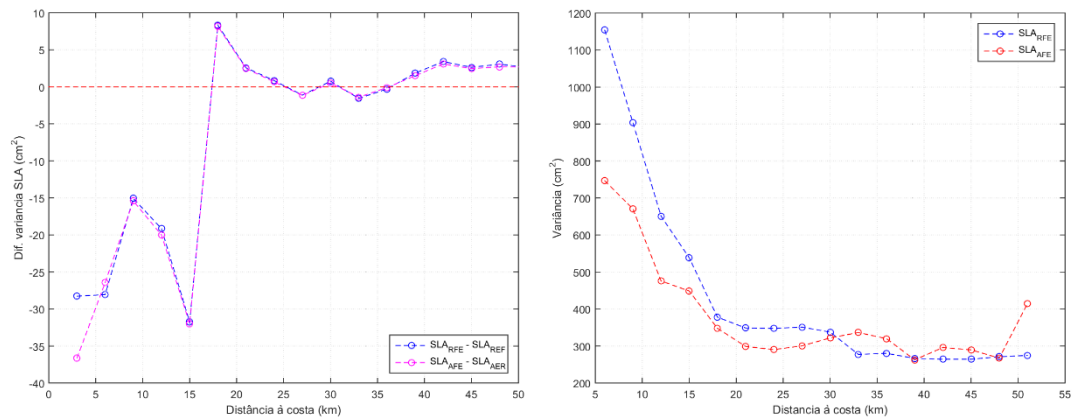


Figura 3.21 – Gráfico da esquerda: Diferença de variância entre os modelos de maré FES e GOT, usando o *range* do produto RADS (azul) e do produto ALES (vermelho). Gráfico da direita: Variância de SLA_{RFE} (a azul) e SLA_{AFE} (a vermelho) em função da distância à costa.

Neste caso observa-se que nas zonas costeiras em média a SLA obtida usando o modelo de maré GOT apresenta menor variância para os valores que se encontram a uma distância aproximada de 20 km da costa. Já comparando o *range* dos dois produtos comprova-se novamente que os dados provenientes do método *retracking* do produto ALES diminuem a variância no cálculo do valor da variação do nível do mar nas zonas costeiras da Indonésia.

É também apresentada na tabela 3.4 a variância da anomalia do nível do mar (SLA) obtida usando as duas correções ERA Interim e GPD para os ciclos 10 - 15 da missão Jason-2. Verifica-se que a variância diminui para a SLA obtido com a correção GPD quando comparado com o valor da SLA obtido modelo ERA. Já a utilização do *range* do ALES permite diminuir a variância no cálculo da SLA para ambas as WTC, tal como se tinha comprovado anteriormente.

Tabela 3.4 - Variância para as várias SLA obtidas para as WTC estudadas usando dados da missão Jason-2.

Ciclo	VAR SLA_{REF} (cm²)	VAR SLA_{AER} (cm²)	VAR SLA_{RGP} (cm²)	VAR SLA_{AGP} (cm²)
10	349.43	357.25	348.14	353.89
11	260.54	292.03	255.64	286.48
12	353.44	316.94	348.51	311.55
13	435.24	353.59	428.84	346.75
14	406.61	339.92	404.03	335.71
15	504.74	376.24	497.04	369.04

Foram também obtidas as variâncias para os valores da variação do nível médio do mar obtidos usando os dois modelos de correção de maré, GOT e FES, usando dados RADS e dados ALES. Podemos também concluir, através da análise da tabela 3.5 e como se tinha verificado anteriormente que não é possível concluir qual o melhor modelo de correção de maré através do valor da variância da SLA ciclo a ciclo.

Tabela 3.5 - Variância do valor da SLA obtido para os dois modelos de correção de maré FES e GOT, usando os dados ALES e RADS.

Ciclo	VAR SLA _{REF(GOT)} (cm ²)	VAR SLA _{AER(GOT)} (cm ²)	VAR SLA _{RFE(FES)} (cm ²)	VAR SLA _{AFE(FES)} (cm ²)
10	349.43	357.25	344.15	352.43
11	260.54	292.03	259.04	289.77
12	353.44	316.94	344.38	308.12
13	435.24	353.60	436.47	352.04
14	406.61	339.92	409.66	340.89
15	504.74	376.24	512.95	384.31

Capítulo IV

4. Análise Espacial

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na análise espacial à região da Indonésia, de modo a verificar o contributo das WTC e das marés bem como a utilização dos dados do produto ALES. Por isso numa primeira fase foi calculada a diferença de variâncias da SLA para a região em estudo usando a WTC dada pelo modelo ERA Interim e pelo algoritmo GPD e os dois modelos de correção de maré GOT e FES. Foram criadas grelhas de $2^\circ \times 2^\circ$ para a missão Envisat e de $4^\circ \times 4^\circ$ para a missão Jason-2. Para missão Jason-2 apenas foi possível criar grelhas de $4^\circ \times 4^\circ$ devido ao número de pontos e de *crossovers* na região de estudo serem bem menores do que a missão Envisat. Foram também determinadas as diferenças de variância nos pontos de cruzamento de passes, designados por *crossovers*, usando os dados provenientes das missões Envisat e Jason-2.

4.1. Diferenças de variância da SLA

Na criação das grelhas foi necessário ter em atenção o tamanho da quadrícula da grelha uma vez que as missões apresentam diferentes características. Para o Envisat os dados apresentam um espaçamento de 80 km no equador enquanto que para o Jason-2 o correspondente espaçamento é bem maior, cerca de 315 km (Fernandes et al., 2015), o que resulta na criação de grelhas com diferentes espaçamentos. Neste processo de criação das grelhas, desenvolvi rotinas em linguagem *Matlab* que calculam a variância de um conjunto de valores da SLA para os ciclos das duas missões altimétricas. Com a variância destes conjuntos de pontos, são então determinadas as diferenças de variância da SLA e assim são criadas grelhas com espaçamento de $2^\circ \times 2^\circ$ para o Envisat e grelhas de $4^\circ \times 4^\circ$ para o Jason-2 usando o software *Surfer*. Está representada

na figura 4.1 a diferença da variância de SLA quando são utilizados o modelo ERA Interim (RER) e o algoritmo GPD (RGP), usando o *range* do produto RADS.

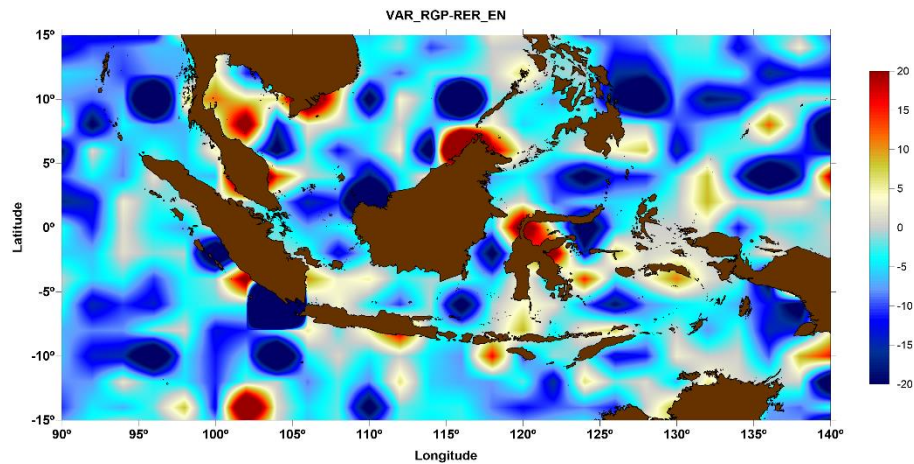


Figura 4.1 - Diferença de variância da SLA_{RGP} e SLA_{REF} para os ciclos 10-94 Envisat para a região da Indonésia

Para a diferença da SLA obtida para a correção GPD e ERA Interim usando os dados RADS (Fig.4.1) verifica-se que em oceano aberto as diferenças apresentam valores negativos. Já para as zonas costeiras grande parte também se apresenta com diferenças negativas. Neste caso comprova-se que SLA_{RGP} apresenta menor variância logo menor erro na estimativa do valor de SLA. Continuando a usar os dados do produto RADS, mas avaliando agora a correção de maré FES e GOT obteve-se o resultado apresentado no gráfico da figura 4.2. Salienta-se o facto da correção de maré GOT ser apresentada com a sigla RER, uma vez que o SLA_{REF} calculado usando a correção ERA utiliza o modelo de maré GOT. Para este caso, não é evidente qual dos modelos de maré se deve adotar para a determinação do valor da SLA para a região em estudo.

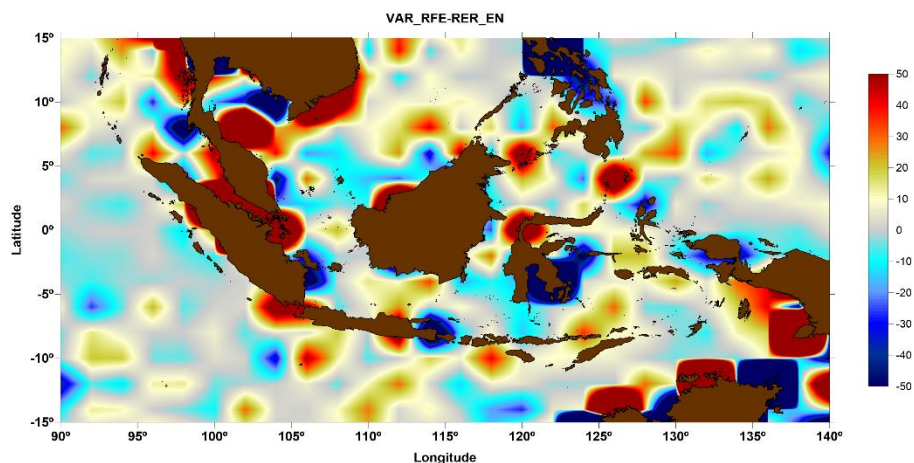


Figura 4.2 - Diferença entre SLA_{RFE} e SLA_{REF} , para os ciclos 10 - 94 da missão Envisat para a região da Indonésia.

Avaliando agora a SLA obtida usando a correção ERA usando os dados dos produtos ALES e RADS, obtém-se o gráfico da figura 4.3. Como se está a utilizar dados ALES, verifica-se que existem diferenças nulas para os pontos com distâncias superiores a 50 km. Isto acontece porque no cálculo do valor da SLA para os valores com distância superiores a 50 km, é utilizado o *range* do produto RADS, uma vez que o método *retracking* distribuído no produto ALES apenas foi realizado para os pontos até à distância de 50 km da linha de costa. Assim a diferença de variância da SLA é nula para os pontos onde são utilizados os valores do *range* do produto RADS. Como o produto ALES foi criado para as zonas costeiras, verifica-se neste caso que existem algumas zonas onde a diferença é positiva, indicando que a SLA obtida usando os dados RADS apresentam menor variância e por isso com melhor estimativa para a variação do mar nessas zonas.

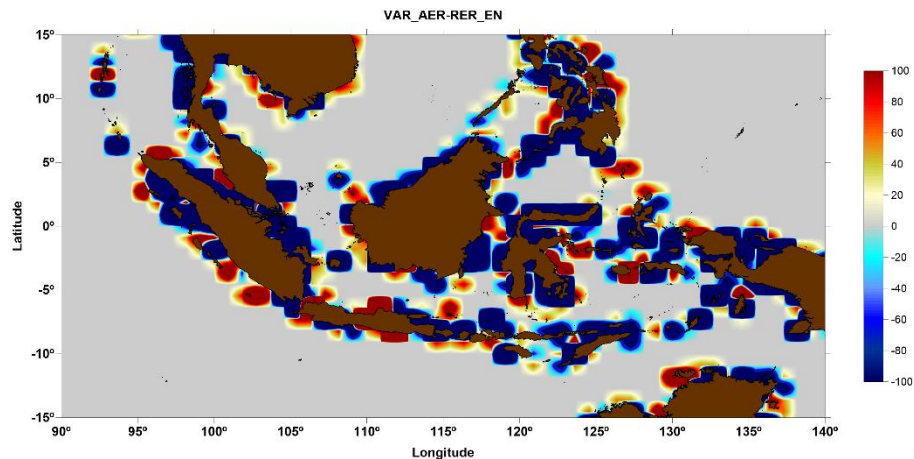


Figura 4.3 - Diferença de variância entre SLA_{AER} e SLA_{REF} para os ciclos 10-94 do Envisat na região da Indonésia.

Passando agora a análise dos dados da missão Jason-2 e como se trata de uma missão com maior espaçamento entre passes no equador, o tamanho da quadrícula para a criação das grelhas é de $4^\circ \times 4^\circ$. Foi comparada a diferença de variância entre as SLA obtidas usando as correções ERA e GPD, inicialmente usando os dados do produto RADS (Fig.4.4).

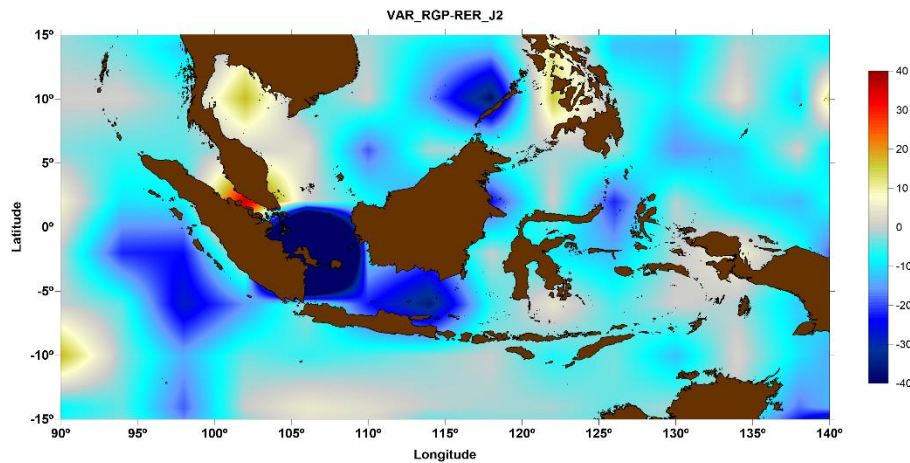


Figura 4.4 - Diferença de variância entre SLA_{RGP} e SLA_{REF} para os ciclos 1-252 do Jason-2 na região da Indonésia.

Para este caso as diferenças são em grande parte negativas, o que indica que a SLA determinado usando a correção GPD apresenta menor variância. Assim sendo, podemos concluir que a correção GPD apresenta melhores resultados quando comparada com a correção ERA. Para avaliar os modelos de correção de maré, usando os dados do produto RADS, foi obtido o gráfico da figura 4.5, representa a diferença de variância entre os dois modelos de correção de maré FES e GOT.

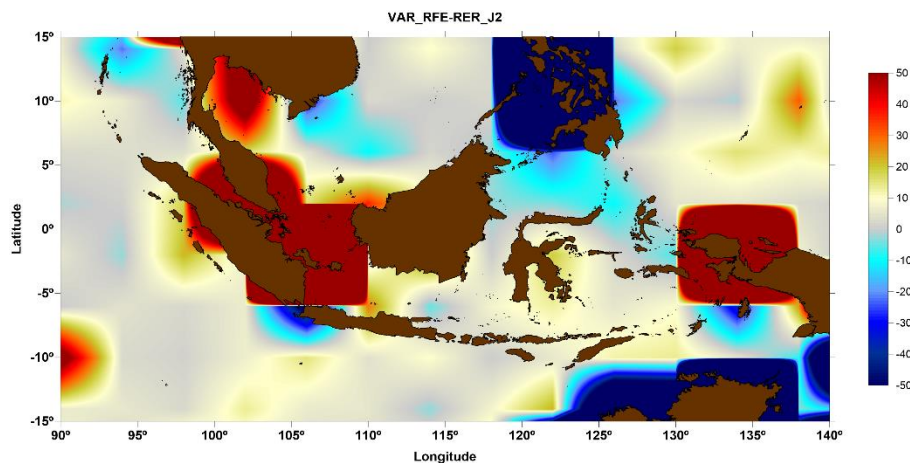


Figura 4.5 - Diferença de variância entre SLA_{RFE} e $SLA_{RER(GOT)}$ para os ciclos 1-252 do Jason-2 na região da Indonésia.

Neste caso, verifica-se que em grande parte as diferenças são positivas o que indica que a SLA obtido com o modelo FES apresentam maior variância quando comparado com a SLA obtido com o modelo de maré GOT. Já para as zonas costeiras em algumas ilhas pertencentes à Indonésia apresentam diferenças negativas o que indica que nessas zonas o conjunto da SLA calculada com o modelo FES apresentam menor variância.

Para os dados da missão Jason-2 não é evidente qual dos dois modelos de correção de maré apresenta melhores resultados nas zonas costeiras. Passando agora para a avaliação dos dados provenientes do produto ALES, determinou-se a diferença entre a SLA obtida usando correção ERA para os dados dos dois produtos (Fig. 4.6).

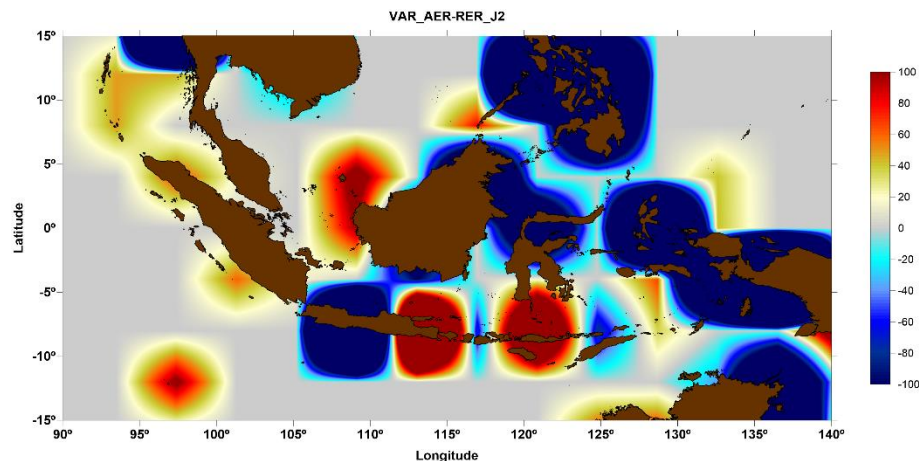


Figura 4.6 - Diferença de variância entre SLA_{AER} e SLA_{REF} para os ciclos 1-252 do Jason-2 na região da Indonésia.

Observa-se que as diferenças de variância da SLA para as zonas costeiras são em grande parte negativas, indicando que para essas zonas o SLA obtido com dados do produto RADS apresentam maior variância. Conclui-se que para este caso os dados ALES apresentam melhores resultados. Verificou-se que com a introdução do *range* do produto ALES, existem muitas zonas que apresentam valores que se encontram no extremo da escala, indicando que nesses casos as diferenças são de facto muito grandes entre os dois produtos.

4.2. Diferenças de variância nos pontos de *crossover*

Numa segunda fase da análise espacial, foi feita a análise dos *crossovers*, como explicado anteriormente, que calcula a diferença de variância nos pontos de cruzamento entre passes ascendentes e passes descendentes para cada conjunto de SLA, usando as duas WTC e os dois modelos de correção de maré GOT e FES. Para obter estes resultados foi utilizada uma rotina em *Fortran* que contém o algoritmo que determina os seus resultados de acordo com os critérios pretendidos. Estes critérios passam por determinar *à priori* a rejeição dos valores absolutos da SLA superior a 2 metros e o intervalo de tempo superior a 10 dias entre os valores da SLA, obtido usando o MJD de cada ponto, para formar um conjunto de pontos suficientes para o cálculo da variância. É evidente que com a diminuição da quadrícula na criação das grelhas, o intervalo de tempo terá de ser superior ao estipulado como referência (10 dias) para obter um conjunto de pontos suficientes para o cálculo da variância. Foram obtidas as diferenças de variância dos *crossovers* inicialmente para os dados da missão *Envisat*, entre os ciclos 10 – 94, numa grelha de 4° x 4° com um intervalo máximo de tempo entre os *crossovers* de 10 dias. São também apresentadas grelhas de 3° x 3° para uma melhor visualização das zonas costeiras e para uma melhor análise das zonas de maior relevância. É representado na figura 4.7 a diferença de variância da SLA usando as correções ERA Interim e GPD, nos pontos de cruzamento de passes, usando os dados do produto RADS.

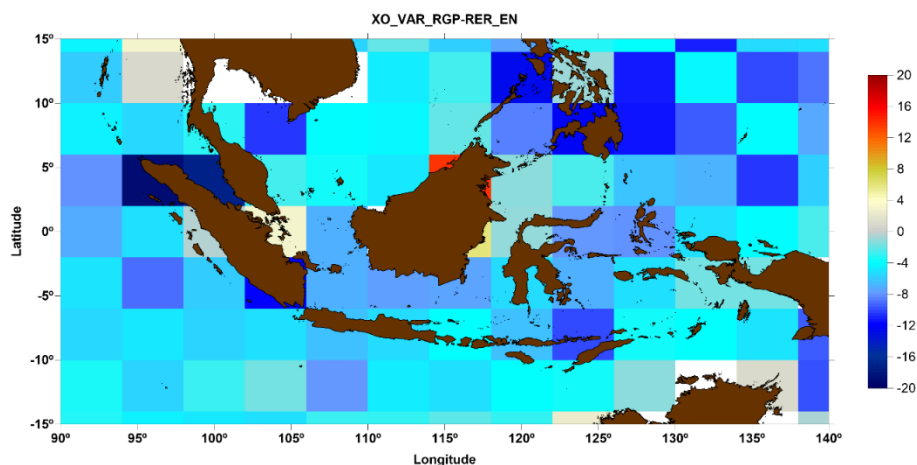


Figura 4.7 – Variação espacial da diferença de variância nos pontos de *crossovers* para SLA_{RGP} e SLA_{REF} usando os ciclos 10 - 94 do Envisat, numa grelha 4° x 4°.

Pela observação do gráfico da figura 4.7 verifica-se que de uma forma geral nos pontos de *crossover* existe uma diferença negativa, indicando que para o cálculo do valor da SLA, os resultados obtidos com uso do GPD apresentam melhores resultados. Verificou-se ainda que na região central, existem duas zonas que indicam que o modelo ERA Interim contribui para uma menor variância da SLA. Com a diminuição da quadrícula da grelha para $3^\circ \times 3^\circ$ e com o aumento do intervalo de tempo máximo dos *crossovers* para 15 dias (Fig. 4.8), observa-se que se mantém a diferença negativa de variância, exceto para a zona central. Verifica-se que existem mais pontos de diferença nula e zonas costeiras onde não existem pontos de *crossovers*.

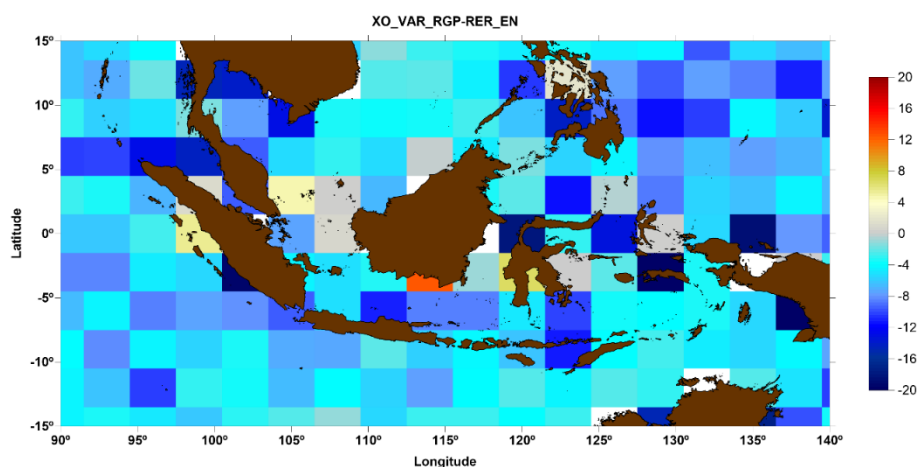


Figura 4.8 - Variação espacial da diferença de variância nos pontos de *crossovers* da SLA_{RGP} e da SLA_{REF} usando os ciclos 10 - 94 do Envisat numa grelha $3^\circ \times 3^\circ$.

Foi verificado para ambas as grelhas que a SLA calculada com o algoritmo GPD apresenta menor variância do que a SLA calculada utilizando o modelo ERA, tal como tinha sido verificado na análise temporal acima descrita. Mantendo os dados da base de dados RADS, fez-se a comparação entre os modelos de maré GOT e FES (Fig. 4.9). É de salientar que na elaboração dos gráficos, a correção de maré referente ao modelo GOT é designada por RER, uma vez que o cálculo da SLA com o modelo ERA Interim utiliza o modelo de maré GOT.

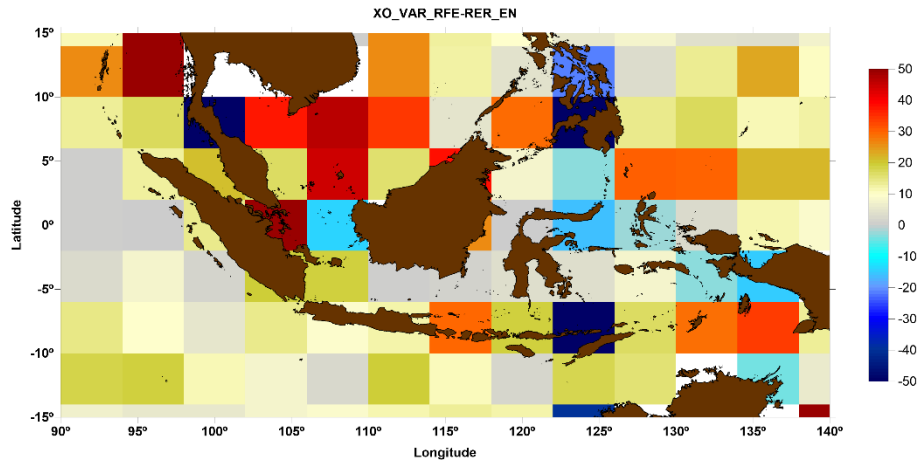


Figura 4.9 - Variação espacial da diferença entre SLA_{RFE} e SLA_{REF} usando os ciclos 10-94 do Envisat numa grelha $4^\circ \times 4^\circ$.

Nos modelos de correção de maré, verifica-se que grande parte das diferenças são positivas indicando que o modelo de correção de maré FES apresenta maior variância quando comparada com o modelo GOT. Uma vez mais, o modelo GOT apresenta melhores resultados para o cálculo do valor da SLA. Reduzindo a tamanho da quadrícula da grelha para $3^\circ \times 3^\circ$, obtêm-se o gráfico da figura 4.10.

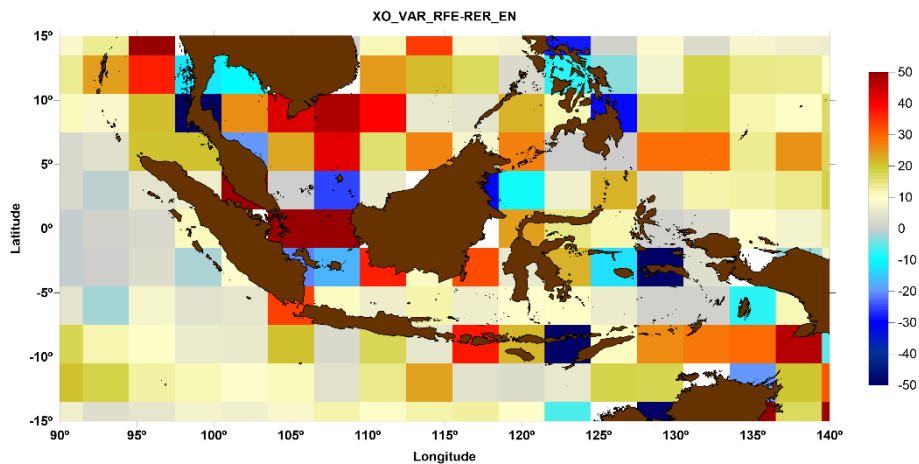


Figura 4.10 - Variação espacial da diferença entre SLA_{RFE} e SLA_{REF} usando os ciclos 10-94 do Envisat numa grelha $3^\circ \times 3^\circ$.

Com a diminuição da quadrícula da grelha, verifica-se novamente de uma forma geral a diferença positiva para a região, salientando as zonas onde o inverso acontece especialmente nas zonas costeiras das ilhas mais a norte. O gráfico obtido é mais detalhado para as zonas costeiras embora continue a existir quadrículas sem pontos de *crossover*, tal como acontece no gráfico da figura 4.9. Com a introdução dos valores da SLA obtidos usando o *range* obtido pelo método *retracking* foram obtidos os seguintes

gráficos. O gráfico da figura 4.11 demonstra a variação da diferença de variância para os valores da SLA determinados usando a correção atmosférica ERA Interim, comparando o *range* do produto RADS (RER) e o *range* obtido por *retracking* (AER).

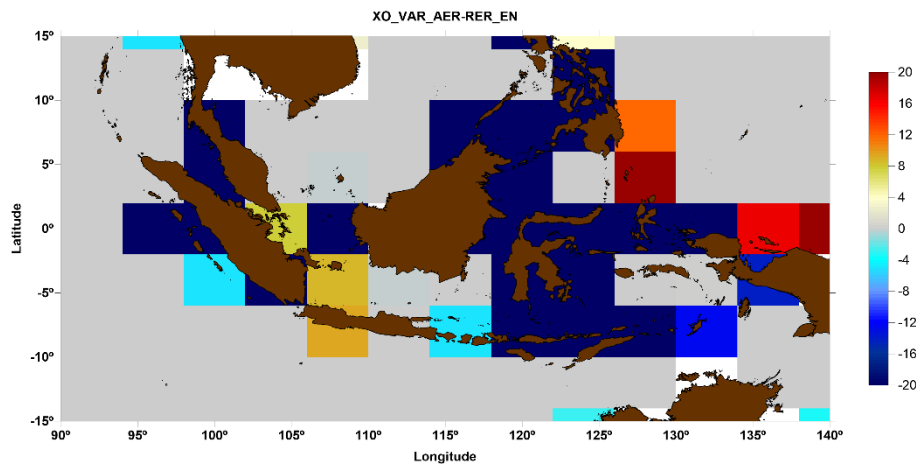


Figura 4.11 - Variação espacial da diferença entre SLA_{AER} e SLA_{REF} usando os ciclos 10-94 do Envisat numa grelha $4^\circ \times 4^\circ$

Neste caso, verifica-se que as diferenças de variâncias apenas se manifestam nas zonas costeiras e grande maioria são negativas. Isto acontece devido ao facto de apenas ter dados ALES até 50km da costa, resultando numa diferença nula para distâncias superiores. Para uma melhor visualização do resultado, reduziu-se a quadrícula da grelha para o tamanho $3^\circ \times 3^\circ$, apresentada no gráfico da figura 4.12.

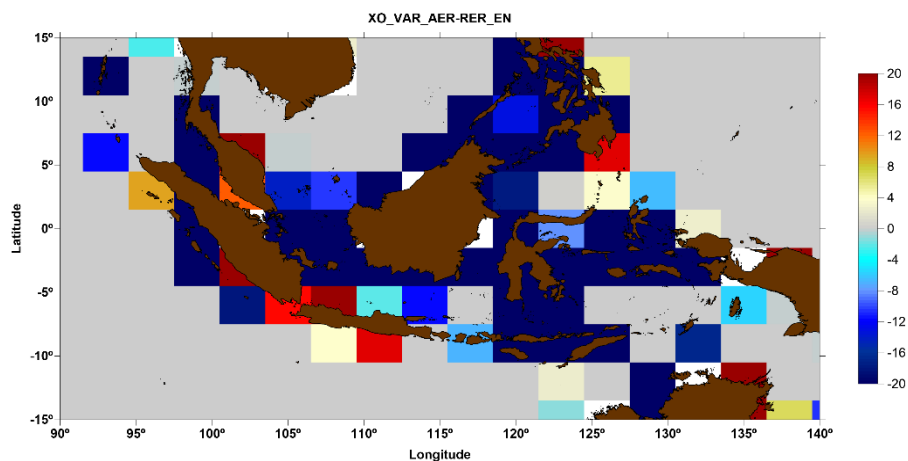


Figura 4.12 - Variação espacial da diferença entre SLA_{AER} e SLA_{REF} usando os ciclos 10-94 do Envisat numa grelha $3^\circ \times 3^\circ$.

Com o resultado obtido (Fig.4.12) existe uma melhor percepção das zonas onde a diferença de variância é positiva, traduzindo-se numa menor variância por parte dos dados RADS, nas ilhas mais a sudoeste. Neste caso para a zona central da região da Indonésia, o cálculo do valor da SLA obtém melhores resultados quando é aplicado o

método de *retracking* ALES. Comparando a correção dada pelo algoritmo GPD com a do modelo ERA Interim usando o *range* dos dois produtos, é obtido o gráfico da figura 4.13, inicialmente numa grelha de $4^\circ \times 4^\circ$.

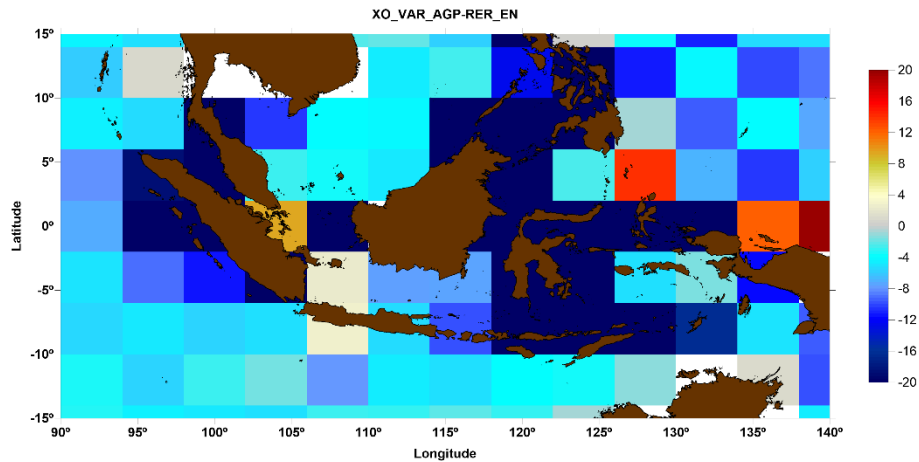


Figura 4.13 - Variação espacial da diferença entre SLA_{AGP} e SLA_{REF} usando os ciclos 10-94 do Envisat numa grelha $4^\circ \times 4^\circ$

Neste caso a diferença é em grande parte negativa indicando novamente que a SLA determinada usando o *range* do produto ALES apresenta menor variância embora existam algumas zonas onde a diferença de variância seja positiva. Ao diminuir a quadrícula da grelha para o tamanho $3^\circ \times 3^\circ$, obtém-se o gráfico da figura 4.14.

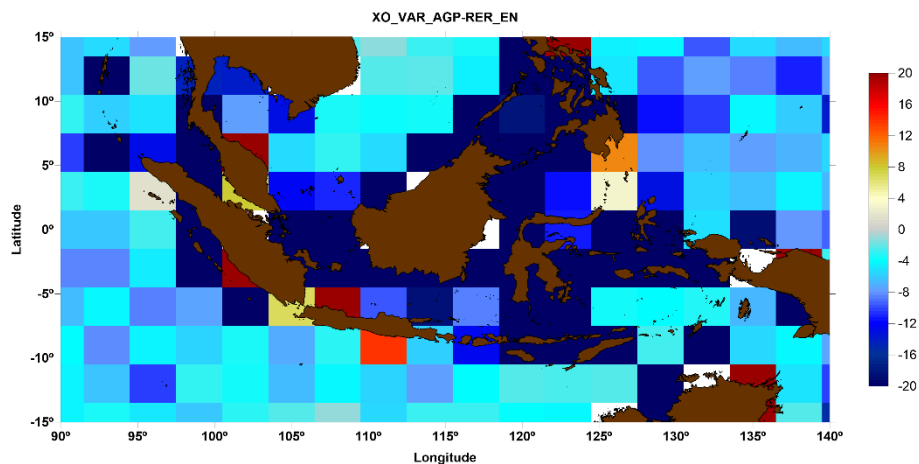


Figura 4.14 - Variação espacial da diferença entre SLA_{AGP} e SLA_{REF} usando os ciclos 10-94 do Envisat numa grelha $3^\circ \times 3^\circ$

Com uma visualização mais detalhada, observa-se novamente que a zona central apresenta uma diferença de variância negativa, mas as ilhas a sudoeste apresentam uma diferença positiva. O facto de acontecer nesta zona pode dever-se à não existência de pontos de *crossover* suficientes para o cálculo da variância.

O algoritmo dos pontos de *crossovers* for igualmente aplicado à missão Jason-2. Como o espaçamento desta missão é de 315 km, apenas foi possível obter grelhas de espaçamento $4^\circ \times 4^\circ$. Como para este caso apenas foram criadas grelhas com este espaçamento, foi mantido o intervalo máximo de tempo entre os pontos de *crossovers* de 10 dias. Foi avaliada inicialmente a diferença de variância dos pontos de *crossovers* para os valores da SLA_{RGP} e os valores de SLA_{REF} (RER) usando os dados RADS.

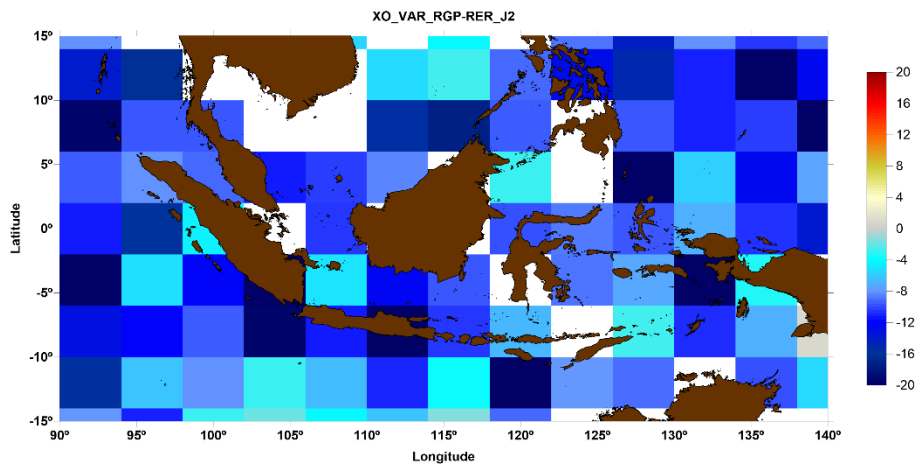


Figura 4.15 - Variação espacial da diferença entre SLA_{RGP} e SLA_{REF} usando os ciclos 1-252 do Jason-2 numa grelha $4^\circ \times 4^\circ$.

Na figura 4.15 podemos observar que as diferenças são negativas indicando o que se tem vindo a concluir acerca da correção GPD, que apresenta menor variância logo apresenta menor erro para o valor obtido para a anomalia do nível do mar (SLA). Infelizmente existe uma ausência de pontos nas zonas costeiras para algumas ilhas, devido ao espaçamento desta missão ser maior que a missão Envisat, não sendo possível visualizar a contribuição desta correção para as zonas junto à costa, o que se irá verificar em todos os gráficos obtidos usando os dados desta missão. Podemos observar no gráfico da figura 4.16 as zonas onde não existem pontos de *crossover*, que coincidem com a ausência de pontos no gráfico da figura 4.15.

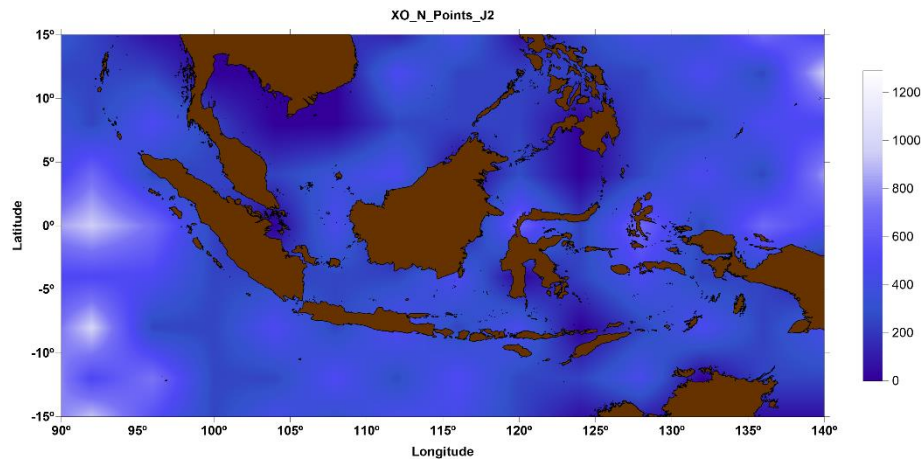


Figura 4.16 - Representação do número de pontos de *crossover* utilizados para a análise da missão Jason-2.

Para avaliar os modelos de correção de maré, foi obtido o gráfico da figura 4.17, que apresenta a diferença de variância da SLA quando são usados os modelos de correção de maré FES e GOT e o *range* dado pelo produto RADS. Neste caso, verifica-se que as diferenças de variância de SLA são em maioria positivas, indicando que nos pontos de *crossover* a variância da SLA calculada com o modelo FES é maior, logo conclui-se que este modelo irá aumentar a variância no cálculo do valor da SLA.

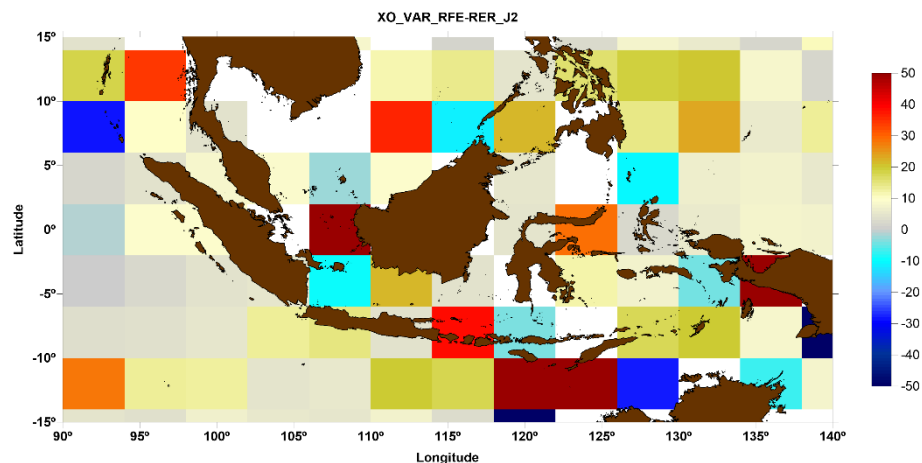


Figura 4.17 - Variação espacial da diferença entre SLA_{RFE} e $SLA_{RER(GOT)}$ usando os ciclos 1-252 do Jason-2 numa grelha $4^\circ \times 4^\circ$.

Para avaliar o contributo dos dados de *retracking*, foram obtidas as diferenças nos pontos de *crossovers* para as SLA obtidas usando o *range* dos produtos altimétricos RADS e ALES, apresentado na figura 4.18.

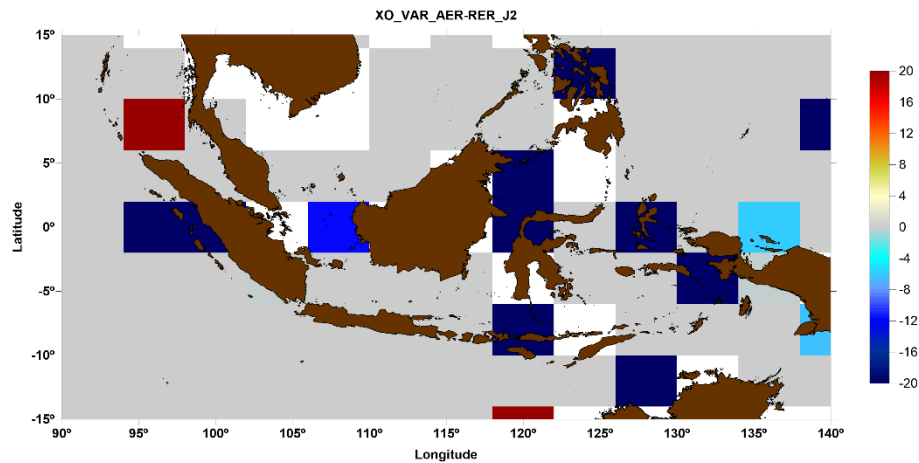


Figura 4.18 - Variação espacial da diferença entre SLA_{AER} e SLA_{REF} usando os ciclos 1 - 252 do Jason-2 numa grelha $4^\circ \times 4^\circ$.

Tal como já foi explicado, os dados ALES apenas contém dados de *retracking* para as zonas até cerca de 50 km da costa, o que resulta numa diferença nula em oceano aberto ou seja para medidas com distâncias superiores. Infelizmente não é possível analisar certas zonas costeiras, mas dos resultados obtidos observa-se que a diferença de variância é em grande parte negativa indicando que os dados ALES apresentam melhor precisão que os dados RADS. Verifica-se ainda que dos dados obtidos, as diferenças de variância encontram-se nos extremos da escala usada, indicando que para essas zonas a distância dada pelo método *retracking* do produto ALES diminuirá significativamente a variância no cálculo do valor da SLA nas zonas costeiras. Na avaliação da contribuição do *range* dado pelos dois produtos, é demonstrado na figura 4.19, que as diferenças são novamente negativas indicando que o método *retracking* ALES contribui para a diminuição da variância da SLA obtida para a região em estudo.

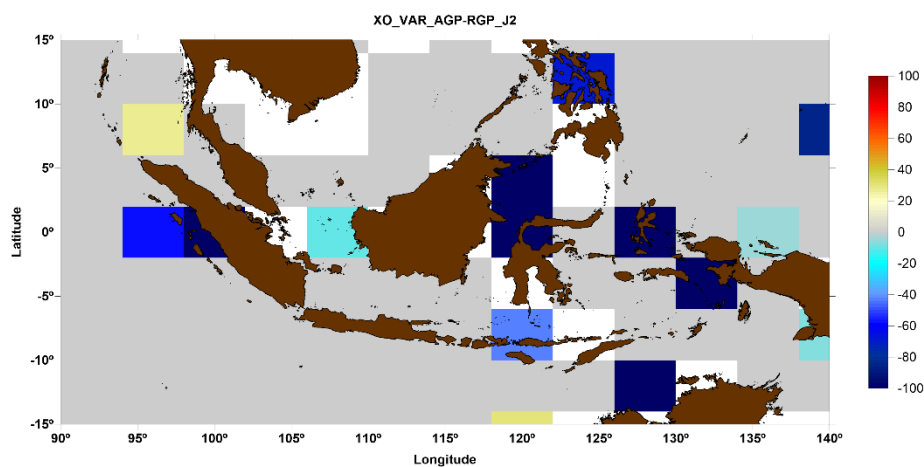


Figura 4.19 - Variação espacial da diferença entre SLA_{AGP} e SLA_{RGP} usando os ciclos 1-252 do Jason-2 numa grelha $4^\circ \times 4^\circ$.

Devido ao espaçamento entre os passes da missão Jason-2, não foi possível estudar o comportamento das WTC nalgumas zonas costeiras. Mesmo assim, conseguiu-se verificar que o algoritmo GPD apresenta melhores resultados nas zonas costeiras. Já para os modelos de correção de maré, verificou-se que em algumas zonas nem sempre o modelo FES é adequado para o cálculo do valor da SLA. Tal não se tinha verificado no capítulo do estudo temporal das duas missões, uma vez que se tinha verificado que o modelo FES contribui para a diminuição da variância nos pontos mais próximos da linha de costa.

Capítulo V

5. Variação do nível do mar

Uma vez que o método *retracking* tem como objetivo obter uma melhor estimativa da distância satélite-superfície para as zonas costeiras e sendo utilizada no cálculo do valor da anomalia do nível do mar, SLA, pretende-se obter uma série temporal demonstrativa dessa mesma variação para a região da Indonésia. Por isso, foram obtidas as séries temporais resultantes do cálculo da anomalia do nível do mar, utilizando os produtos geofísicos que apresentam os melhores resultados demonstrados nos capítulos anteriores, tendo sido comparado com a SLA de referência. Para ser possível analisar a série e por sua vez determinar a variação do nível do mar na região da Indonésia, foi aplicado um método designado por STL, descrito no capítulo 2, para decompor o sinal original nas suas componentes. Foram utilizados os dados referentes à missão altimétrica Jason-2, uma vez que apresenta um conjunto de pontos suficientes para a aplicação deste método. Na aplicação do método é necessário escolher os parâmetros de entrada de acordo com as características da série e as especificações do método STL (Cleveland, et al., 1990). Foram utilizados os seguintes valores que se encontram descritos na seguinte tabela (Tab 5.1).

Tabela 5.1 - Parâmetros de entrada usado no método STL de acordo com a série e recomendações de Cleveland, et al.

Parâmetro	Valor	Recomendação
n_p	36	Periodicidade dos dados: 36 ciclos de repetição (~10 dias) por ano.
n_i	3	Têm de ser positivo e inteiro
n_o	0	Série não apresenta valores atípicos, logo não é aplicável
n_l	37	Tem de ser inteiro impar maior ou igual a n_p
n_t	59	Tem de ser inteiro impar e estar compreendido entre $1.5 \times n_p$ e $2.0 \times n_p$
n_s	37	Tem de ser inteiro impar igual ou superior a n_p

Além disso, para ser possível comparar a variação do nível do mar na Indonésia com o estudo realizado por *Handoko, et al. (2014)*, apenas foram considerados os valores da SLA obtidos para o período de 2009-2014. Podemos observar a série para a SLA de referência, que utiliza o *range* dado pelo produto RADS, a correção ERA Interim e a correção de maré dada pelo modelo GOT, para a Indonésia no gráfico da figura 5.1, acompanhada com os sinais que a caracterizam. O sinal anual está centrado no valor zero para facilitar a interpretação da figura.

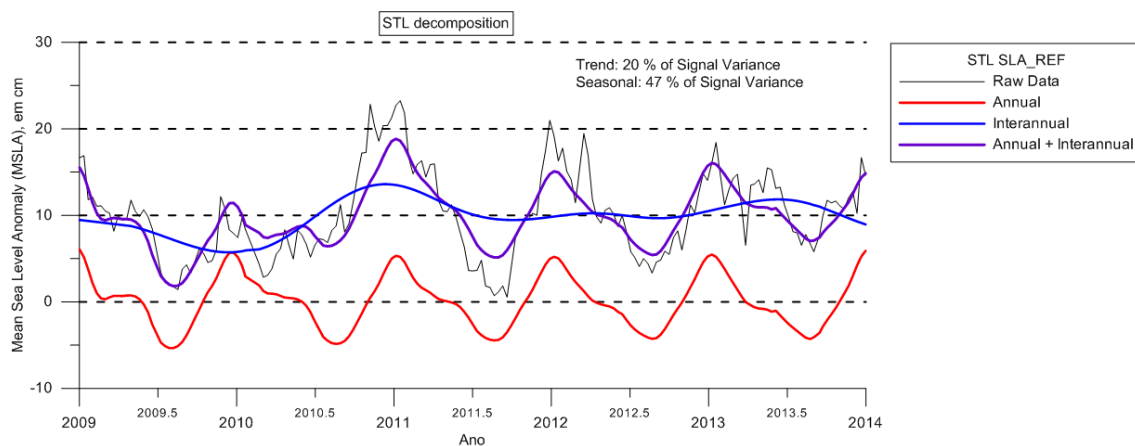


Figura 5.1 – Decomposição do sinal original (a preto) nas várias componentes obtidas através da análise STL: sinal anual (a vermelho), sinal interanual (a azul) e a soma do sinal anual com o sinal interanual (a roxo).

Verificou-se que a série temporal da SLA de referência é caracterizada na maioria pelo sinal sazonal. Com a componente interanual representada no gráfico da figura 5.1, foi calculada a tendência linear da série através de um ajuste linear do sinal interanual de forma a ser possível quantificar a variação do nível do mar para a região da Indonésia.

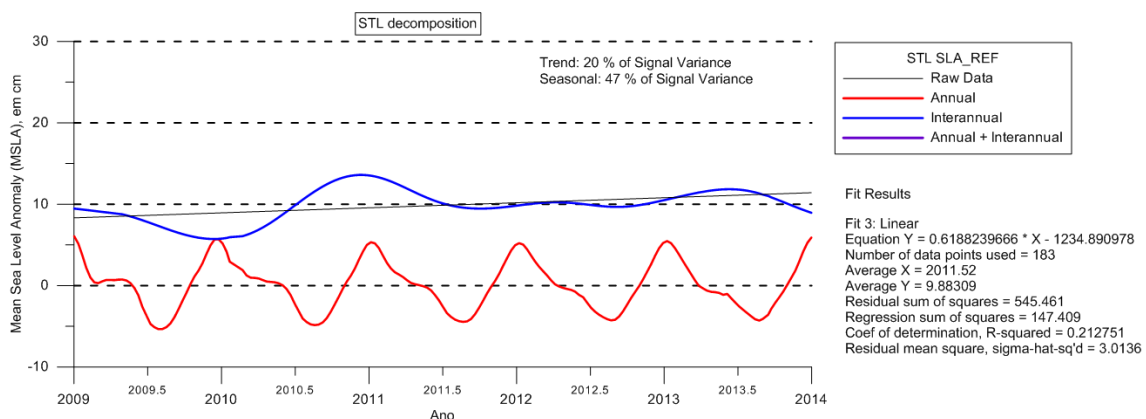


Figura 5.2 - Representação do sinal anual (a vermelho), tendência (a azul) e ajuste da tendência (a preto).

No caso da SLA de referência para a Indonésia, observa-se que o nível do mar aumentou cerca de 6.2 mm/ano no período de 2009-2014. Chama-se a atenção para o facto de a regressão linear não apresentar um bom coeficiente para determinar a variação do nível do mar, devido ao facto de ser uma análise a um curto período de tempo. Apesar disto, o valor encontra-se de acordo com um estudo efetuado para esta região (Handoko et al., 2014). Foi gerada uma série temporal da SLA utilizando o *range* do produto ALES, a correção dada pelo algoritmo GPD e a correção de maré dada pelo modelo GOT. Assim, o mesmo procedimento foi adotado para a serie temporal do SLA_{AGP} , apresentado na figura 5.3.

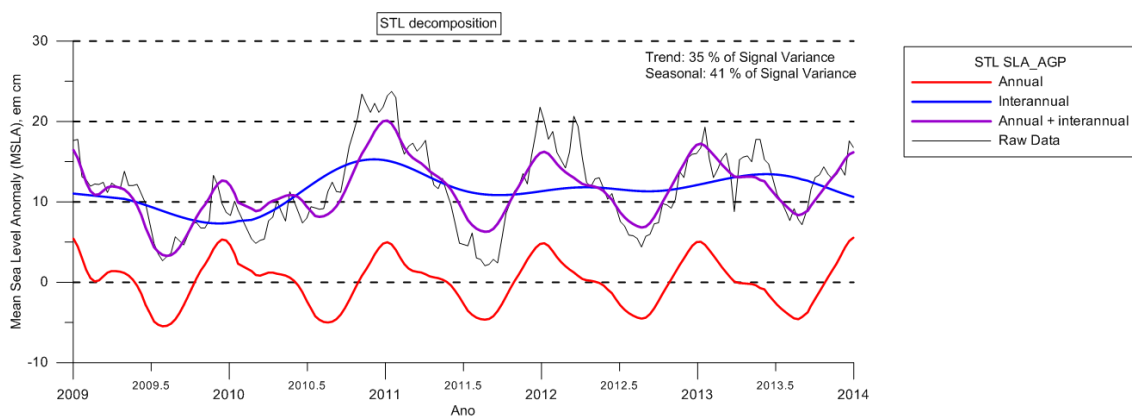


Figura 5.3 - Decomposição do sinal original (a preto) dadas pelo STL: sinal anual (a vermelho), sinal interanual (a azul) e a soma do sinal anual com o sinal interanual (a roxo).

Para a SLA representada no gráfico da figura 5.3, também se tentou ajustar uma reta à componente interanual do sinal (representada a azul), de forma a quantificar a contribuição destes dados.

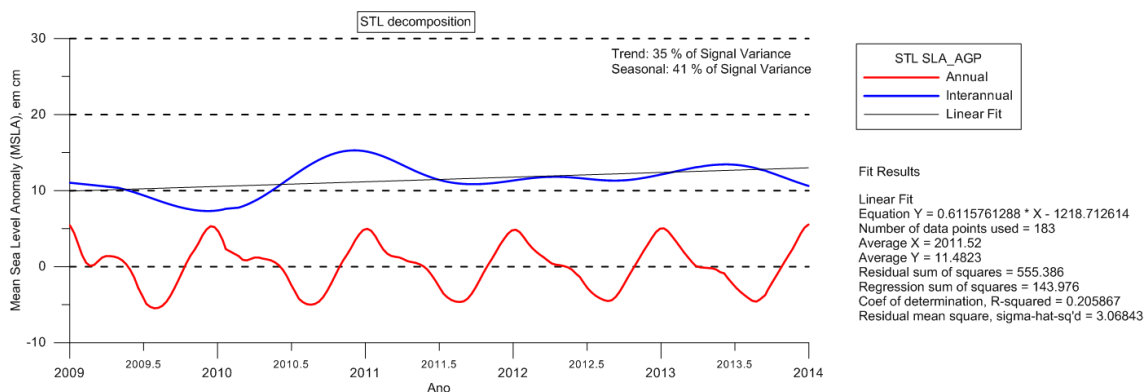


Figura 5.4 - Representação do sinal anual (a vermelho), tendência (a azul) e ajuste da tendência (a preto).

Neste caso, verifica-se que a variação do nível do mar para a Indonésia é cerca de 6.1 mm/ano e que o RMS é de 3.07 cm. A série é composta por 41% da componente sazonal e o ajuste ao sinal interanual apresenta um coeficiente de determinação baixo para a qualidade do ajuste. Com a introdução do *range* ALES e a correção GPD, apenas se verifica que a variação do nível do mar diminui cerca de 0.1 mm.

Capítulo VI

6. Conclusão

Para uma avaliação dos produtos utilizados em altimetria por satélite foi necessário compreender a técnica de aquisição das medidas e os erros a que estas estão sujeitas, especialmente nas zonas costeiras. Foi também tido em consideração a escolha da região de estudo devido às suas características geográficas e ao facto de ser uma zona de grande variabilidade oceânica. Por isso, este trabalho foi dividido em três etapas tendo sempre como objetivo principal a avaliação dos produtos altimétricos melhorados nas zonas costeiras da Indonésia, utilizando as missões altimétricas Envisat e Jason-2. Os produtos altimétricos utilizados foram: os modelos atmosféricos ERA Interim, e quando possível, o modelo *Composite*, o algoritmo GPD e os modelos de correção de maré FES2012 e GOT4.10. Foi também avaliada a qualidade dos dados obtidos pelo método de *retracking* usado na geração do produto altimétrico ALES nomeadamente da distância satélite-superfície (*range*) que é utilizada no cálculo do valor da SLA.

Numa primeira fase, foi feito o estudo da variação temporal de cada produto altimétrico e a sua contribuição para o cálculo do valor da anomalia do nível do mar, SLA, quantidade utilizada para quantificar a variabilidade oceânica. Para avaliar esta contribuição foi determinada a variância de cada SLA para a região, a diferença de variância entre a SLA de referência e o conjunto de SLA obtidos pelos produtos altimétricos para cada missão e em função da distância à costa. Verificou-se que o algoritmo GPD apresenta melhores resultados do que as correções ERA e *Composite*, esta última apenas avaliada para a missão Envisat. Observou-se também que para a missão Envisat o modelo de correção de maré GOT4.10 apresenta melhores resultados para o cálculo do valor da SLA. Para a missão Jason-2, verificou-se que o modelo FES2012 apresenta resultados ligeiramente melhores do que o modelo GOT4.10 para as zonas costeiras. Em todos os casos concluiu-se que o valor do *range* obtido por *retracking* contribui para a diminuição da variância da SLA para a região de estudo, principalmente nas zonas mais perto da linha de costa.

Na segunda fase deste trabalho, foi estudada a variação espacial de cada produto altimétrico para a região da Indonésia. Foram criadas grelhas representativas da diferença de variância entre SLA obtidas usando as WTC e de marés e a SLA de referência. Foi verificado que o algoritmo GPD e o modelo de maré GOT4.10 apresentam os melhores resultados para a região, principalmente nas zonas costeiras. Foi também avaliada a diferença de variância da SLA nos pontos de cruzamento entre os passes, designado por *crossover*, para cada ciclo e para cada missão altimétrica. Neste caso, concluiu-se novamente que o algoritmo GPD juntamente com o modelo de maré GOT4.10 apresentam os melhores resultados, ou seja, menor variância, para a missão Envisat. Devido às características da missão Jason-2, não foram obtidos pontos de cruzamento suficientes para avaliar quais os modelos que fazem diminuir a variância da SLA para as zonas costeiras.

Na última parte deste trabalho, foi determinada a variação do nível do mar para a região da Indonésia, utilizando a SLA de referência e a SLA com a correção GPD e o modelo de correção de maré GOT4.10. Foi utilizado o método STL que permitiu decompor a série nos sinais que a caracterizam. Assim foi possível quantificar a variação do nível do mar para as duas séries temporais determinando a contribuição tanto do algoritmo GPD como do *range* do produto ALES. Para a SLA de referência foi verificado que houve um aumento do nível do mar cerca de 6.2 mm/ano para o período de 2009 - 2014. Já para a série temporal obtida usando a correção GPD e com o *range* do produto ALES, verificou-se um decréscimo na variação, tendo sido obtido 6.1 mm/ano. As séries temporais são caracterizadas pelo sinal sazonal, na ordem dos 40%, sendo apenas a componente interanual responsável por 20% a 30% do sinal original. Estes encontram-se de acordo com os resultados do estudo de *Handoko et al.* efetuado para a região da Indonésia (Handoko et al., 2014). De salientar, ainda, o facto de apenas terem sido utilizados dados de uma missão altimétrica, da metodologia usada neste estudo não ser a mesma e o período da série usado neste trabalho ser mais pequeno do que o do estudo comparativo.

Com este trabalho pode-se concluir que o algoritmo GPD apresenta os melhores resultados quando comparado com os modelos ERA Interim e do *Composite*. Para os modelos de correção de maré FES2012 e GOT4.10, conclui-se que na análise ciclo a ciclo, o modelo GOT4.10 apresenta menor variância, mas em função da distância à costa conclui-se que o modelo FES2012 diminui a variância no cálculo dos valores da SLA para as medidas que se encontram à distância cerca de 10 – 20 km da costa.

Comprovou-se que o *range* obtido pelo método de *retracking* ALES diminui a variância da SLA e por isso influencia positivamente na determinação do nível do mar para as zonas costeiras, nomeadamente na região da Indonésia.

Durante todas as análises efetuadas, verificou-se que as correções influenciam a determinação do valor da SLA, que permite quantificar a variabilidade oceânica. Dos produtos estudados neste trabalho, conclui-se que o *range* influencia positivamente a determinação do SLA, uma vez que com o método *retracking* permitiu determinar uma das variáveis com maior variabilidade, como comprovado na análise temporal, principalmente nas zonas costeiras. Uma melhoria na determinação desta variável, juntamente com as várias WTC e de maré que apresentam melhores resultados, irá resultar numa determinação do valor da SLA com menor erro possível e de acordo a variabilidade existente nas zonas costeiras com o mesmo rigor do SLA já obtido em alto mar. Num trabalho futuro, poderá ser adotada uma metodologia diferente de forma a ser possível comparar o valor da SLA obtido para a região com dados de marégrafos, bem como compreender certos resultados obtidos durante a análise temporal, principalmente quando é feita uma combinação entre os dados do produto ALES e do modelo *Composite*. Para estudar os modelos de correção de maré, poderá ser feita uma combinação entre os modelos de acordo com a distância à costa, e verificar os resultados obtidos nas análises temporais e espaciais como na quantificação do valor da SLA para a região em estudo. A análise efetuada durante este trabalho, poderá ser igualmente aplicada a outra região de forma a comparar os resultados obtidos para as duas regiões e assim compreender resultados inconclusivos obtidos neste trabalho.

Referências

Ablain, M., Cazenave, A. & Guinehut, S., 2009. A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993-2008. *Ocean Science*, Issue www.ocean-sci.net/5/193/2009/, pp. 193-201.

Andersen, O. & Scharroo, R., 2011. Range and Geophysical Corrections in Coastal Regions: And Implications for Mean Sea Surface Determination. Em: *Coastal Altimetry*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 103 - 145.

AVISO, s.d. *Satellite Altimetry Data*. [Online]
 Available at: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/missions.html>
 [Acedido em Maio 2016].

Bao, L., Lu, Y. & Wang, Y., 2009. Improved retracking algorithm for oceanic altimeter waveforms. *Progress in Natural Science*, Issue doi:10.1016/j.pnsc.2008.06.017, pp. 195-203.

Berrisford, P. Berrisford, P., Dee, D., Poli, P., Brugge, R., Fielding, K., Fuentes, M., Kallberg, P., Kobayashi, S., Uppala, S., Simmons, A., 2011. *The Era-Interim Archive*, United Kingdom: ECMWF Publications.

Chelton, D. Chelton, D.B., Ries, J.C., Haines, B.J., Fu, L-L., Callahan, P.S., 2001. Satellite Altimetry. Em: A. Press, ed. *Satellite altimetry and earth science*. s.l.:International Geophysics Series, pp. 1-131.

Cleveland, R., McRae, J. & Terpenning, I., 1990. STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, 6(Statistic Sweden), pp. 3-73.

Dee, D. et al., 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system.. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Volume 137, p. 553–597.

Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., P., Bechtold, A. C. M., Beljaars, L., van de Berg, J., Bidlot, N., Bormann, C., Delsol, R., Dragani, M., Fuentes, A.J., Geer; Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler,

M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B-K, Peuby, C., de Rosnay, P., Tavalato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system.. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Volume 137, p. 553–597.

Desportes, C., Oblis, E. & Eymard, L., 2007. On the wet tropospheric correction for altimetry in coastal regions.. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Volume 47, NO. 7, p. 2139–2149.

Fernandes, M. J., Lázaro, C., Ablain, M. & Pires, N., 2015. Improved wet path delays for all ESA and reference altimetric missions. *Remote Sensing of Environment*, pp. 50-74.

Fernandes, M. J., Lázaro, C. L., Nunes, A. & Scharroo, R., 2014. Atmospheric Corrections for Altimetry Studies over Inland Water. *Remote Sens.*, 6, pp. 4952-4997.

Fernandes, M. J., Lázaro, C., Nunes, A. L., Pires, N., Ablain, M., Benveniste, J., 2013. *GPD wet tropospheric correction for all ESA and reference altimetric missions*. Edinburgh, UK, ESA Living Planet Symposium.

Gomes-Enri, J. et al., 2010. Modelling Envisat RA-2 waveforms in the coastal zone: case study of calm water contamination. *IEEE Geoscience and remote sensing letter*, Volume 7, pp. 474 - 478.

Handoko, E. Y., Fernandes, M. J. & Lázaro, C., 2014. *Impact of Different Wet Tropospheric Corrections on Sea Level Change in the Indonesia Region*. Germany, Esa.

Legeais, J.-F., Ablain, M. & Thao, S., 2014. Evaluation of wet troposphere path delay from atmospheric reanalyses and radiometers and their impact on the altimeter sea level. *Ocean Sci.*, 10, pp. 893-905.

Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T. & Francis, O., 2006. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56(Springer-Verlag), pp. 394-415.

Naeije, M., Scharroo, R. & Doornbos, E., 2007. *Next Generation altimeter service challenges and achievements*. Montreux, Switzerland, ESA SP-636.

Naeije, M., Schrama, E. & Scharro, R., 2000. The Radar Altimetry Database System project RADS. *International Geoscience nad Remote Sensing Symposium*.

Nicholls, R. & Cazenave, A., 2010. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, Volume 328, pp. 1517-1520.

Nurmaulia, S. L., Marc-Fenoglio, L. & Becker, M., 2010. Long-term sea level change from satellite altimetry and tide gauges in the indonesia region. *Proceedings ESA Living Planet Symposium SP-686*.

Passaro, M., 2015. *Design, Validation and Application of a new coastal altimetry strategy*, University of Southampton: PhD Thesis.

Passaro, M., Cipollini, P. & Snaith, H., 2015. *ALES Coastal Geophysical Data Records (CGDR) User Handbook Version 1.0 – 12/10/2015.*, Southampton (UK): National Oceanography Centre.

Passaro, M. et al., 2014. ALES: A multi-mission adaptive subwaveform retracker for coastal and open ocean altimetry.. *Remote Sensing of Environment*, 145,, pp. 173-189.

Ray, R., 1999. *A global Ocean Tide Model From TOPEX/POSEIDON Altimetry: GOT99.2.*, Greenbelt, Maryland 20771: NASA. Goddard Space Flight Center.

Ray, R., Egbert, G. & Erofeeva, S., 2011. Tide Predictions in Shelf and Coastal Waters: Status and Prospects. Em: *Coastal Altimetry*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 191 - 216.

Scozzari, A., Gomez-Enri, J., Vignudelli, S. & Soldovieri, F., 2012. Understading target-like signaals in coastal altimetry: Experimentation of a tomographic imaging technique. *Geophysical Research Letters*, Volume 39, p. L02602.

Tai, C.-K., 1989. An Efficient Algorithm for Computing the Crossovers in Satellite Altimetry. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, Volume 6, pp. 13-18.

Tournadre, J., 2007. Signature of Lighthouses, Ships, and Small Islands in Altimeter Waveforms. *Journal of Atmospheric And Oceanic Technology*, Volume 24, pp. 1143-1149.

Zawadzki, L., Ablain, M., Carrere, L., Ray, R., Zelensky, P., Lyard, F., Guillot, A., Picot, N.I., 2016. Reduction of the 59-day error signal in the Mean Sea Level derived from TOPEX/Poseidon, Jason-1 and Jason-2 data with the latest FES and GOT ocean tide models. *Ocean Sci. Discuss.*